

Infiltrasjonssandfang

-Dimensjoneringskriterier og
kapasitetsmåling

Marte Irtun Aas

Bygg- og miljøteknikk

Innlevert: juni 2017

Hovedveileder: Tone Merete Muthanna, IBM

Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet
Institutt for bygg- og miljøteknikk

FORORD

Denne masteroppgaven er gjennomført ved institutt for bygg- og miljøteknikk ved Norges teknisk- og naturvitenskapelige universitet, NTNU Trondheim. Oppgaven er gjennomført innenfor studieretningen Vann- og miljøteknikk. Veileder ved NTNU har vært førsteamanuensis Tone Merete Muthanna.

Oppgaven handler om infiltrasjonssandfang som en løsning for håndtering av overvann. Dette er en forholdsvis ny løsning for håndtering av overvann, som det er gjort minimalt med forskning og studier på tidligere. Det har vært veldig spennende, men også krevende å fordype seg i ett «komplekst anlegg» som det finnes lite tidligere forskning og faglitteratur om.

Det er flere aktører som har vært med som samarbeidspartnere; NTNU, Skjævelandgruppen og Asplan Viak AS. Tusen takk til min veileder Tone Merete Muthanna, ved NTNU, for veiledning gjennom hele oppgaven. Takk til Per Møller-Pedersen i Skjævelandgruppen for god hjelp gjennom oppgaven og til gjennomføring av forsøk på infiltrasjonssandfang i Sandnes. En stor takk til Kim Haukeland Paus i Asplan Viak for gode innspill og god hjelp underveis. Også en stor takk til Marius Møller Rokstad ved Asplan Viak Trondheim for gode innspill underveis og takk til Vebjørn Knotten for innspill og for hjelp til gjennomføring av forsøk i Trondheim. Tusen takk til Trondheim Bydrift for hjelp til gjennomføring av forsøk.

Trondheim, 16.06.2017

Marte Irtun Aas

ABSTRACT

This master thesis focuses on a “standardised” solution for infiltration-based sand traps, a so-called IFS-manhole. An IFS-manhole is a sand trap with infiltration as a unit process. The IFS-manholes is designed by StormAqua, and produced by Skjæveland Cementstøperi in Sandnes. This thesis is in cooperation with Asplan Viak AS, whom as consulting engineers, expresses the lack of an unambiguously method for designing this solution for stormwater management. StormAqua is developing a guide for dimensioning and designing IFS-manholes. Based on this, the aim of this thesis is to determine the important factors for dimensioning infiltration-based sand traps and to propose a method for designing a solution. The results in the thesis are based on field experiments conducted on built IFS-manholes.

Given this, a method to test the capacity of IFS-manholes has also been developed. The total capacity of the designed infiltration sand trap will be the detention volume of the surrounding gravel and the total volume of infiltration during design storm.

Field experiments were conducted on infiltration sand traps in Trondheim and in Sandnes. The experiments measured the infiltration rate of each sand trap while the detention volume is calculated based on the sand traps blueprints.

The infiltration rate can also be calculated with a simplified version of Darcy’s equation:

$$Q = K_{sat} * A$$

Where Q is the infiltration rate [m^3/hr], K_{sat} is the saturated hydraulic conductivity [m/hr] and A [m^2] is the area of infiltration.

The saturated hydraulic conductivity can be found from maps, but it is recommended to measure it in field. The results from the experiments indicates that the effective infiltration of the side slope is between 30 – 50%.

The key-factors for the design of infiltration sand traps will be the local hydraulic conductivity and the design of the surrounding gravel volume. The rain develop method can be used to check the capacity of a sand trap and compare it to set given capacity requirements.

SAMMENDRAG

Denne masteroppgaven omhandler infiltrasjonsbaserte kumløsninger, og fokuserer på en typisk «standardisert» løsning, IFS-kum (infiltrasjonssandfangskum). Kummen er utviklet av StormAqua i Sandnes. Oppgaven er også et samarbeid med Asplan Viak AS, som rådgivende ingeniører belyser de mangelen på en entydig metode for å dimensjonere infiltrasjonssandfang for håndtering av overvann. StormAqua utvikler for tiden en dimensjoneringsveileder til kumløsningen. På bakgrunn av dette har oppgavens målsetning vært å komme fram til viktige faktorer ved dimensjonering og en måte å dimensjonere infiltrasjonssandfang. Resultatene i oppgaven er basert på forsøk utført på bygde infiltrasjonssandfang. Det er i løpet av oppgaven utviklet en metode for å teste kapasiteten til allerede bygde infiltrasjonssandfang. Kapasiteten til infiltrasjonssandfanget kan beskrives som summen av den totale infiltrasjonen i løpet av den dimensjonerende nedbørshendelsen og fordrøyningsvolumet.

Det er utført forsøk på infiltrasjonskummer på Tiller i Trondheim og på testfeltet til Multiblokk i Sandnes. Forsøkene måler kummens infiltrasjonskapasitet, mens fordrøyningsvolumet beregnes fra byggetegningene. For begge forsøkene er det usikkerheter knyttet til utformingen av kummens omkringliggende pukkvolum, ettersom byggetegningene er lite spesifikke.

Infiltrasjonssandfangenes kapasitet er også beregnet basert på byggetegningene. Byggetegningene er grunnlaget for bestemmelse av kummens fordrøyningsvolum og infiltrasjonsareal. Infiltrasjonskapasiteten beregnes så med en forenklet form av Darcy's lov:

$$Q = K_{sat} * A$$

Hvor Q er infiltrasjonsraten [m^3/s], K_{sat} er den mettede hydrauliske ledningsevnen [m/t] og A er det effektive infiltrasjonsarealet [m^2].

Den hydrauliske kapasiteten kan vurderes på bakgrunn av kartdata, men målinger i felt anbefales da de gir den mest realistiske verdien. Det er foretatt målinger av den hydrauliske konduktiviteten like i nærheten av kummene på Tiller. Disse målingene er utført med MPD-infiltrrometer. Hydraulisk kapasitet i Sandnes er basert på forsøk som er utført med infiltrrometer i forkant av utbyggingen av testfeltet.

Forsøkene og beregningene benyttes så for å komme fram til dimensjoneringskriterier for infiltrasjonssandfang. Forsøkene indikerer at formelen kan anvendes for å estimere infiltrasjonsraten og fra forsøkene estimeres det at mellom 30-50% av arealet i sideskråningene bidrar til infiltrasjon.

De viktigste parameterne ved dimensjonering av en infiltrasjonskum vil være den stedlige hydrauliske konduktiviteten og utformingen av det omliggende pukkvolumet. Pukkvolumets utforming er avgjørende for infiltrasjonsarealet og volumet som er tilgjengelig for fordrøyning. For å dimensjonere kummen til å ha en kapasitet for å håndtere en dimensjonerende nedbørshendelse må kummen i løpet av hendelsens varighet ha en samlet kapasitet som er større en det totale volumet hendelsen skaper. Regnvelopmetoden er benyttet til denne dimensjoneringen.

INNHOLDSFORTEGNELSE

Forord	i
Abstract.....	ii
Sammendrag	iii
Innholdsfortegnelse	v
1 Oppgaven	1
1.1 Bakgrunn	1
1.2 Målsetning og forskningsspørsmål	1
1.3 Oppgavens avgrensninger.....	2
2 Teori om overvann.....	3
2.1 Hydrologi i urbane områder	3
2.1.1 Hydrologisk sirkel	3
2.1.2 Urbanisering.....	4
2.1.3 Klima	6
2.1.4 Klimafaktor	6
2.2 Krav til håndtering av overvann	8
2.2.1 3-leddsstrategi.....	8
3 Infiltrasjonskummer.....	11
3.1.1 Fordeler.....	15
3.1.2 Ulemper.....	16
4 Teori Infiltrasjon og perkolasjon	18
Figur 10 Illustrasjon over vannstrømning fra overflaten og videre ned i jorden. Figuren viser forskjellen på de ulike begrepene.	18
4.1 Jordens egenskaper	19
4.2 Infiltrasjon	20
4.2.1 Formelverk for infiltrasjon	21
4.3 Perkolasjon.....	22
4.3.1 Formelverk for perkolasjon.....	23
4.4 Hydraulisk konduktivitet	24
4.5 Måling av infiltrasjon ved MPD.....	26
5 Beskrivelse av forsøksfelt	27
5.1 Trondheim, Tiller.....	27

5.1.1	Beskrivelse av infiltrasjonssandfang	28
5.1.2	Volum- og areal.....	30
5.1.3	Infiltrasjonskapasitet.....	32
5.1.4	Hydraulisk konduktivitet	34
5.2	Sandnes, Multiblokk.....	35
5.2.1	Beskrivelse av infiltrasjonssandfang	36
5.2.2	Hydraulisk konduktivitet	39
6	Metode.....	41
6.1	Trondheim, Tiller.....	41
6.1.1	Forsøk med vann i infiltrasjonskum	41
6.1.2	Beregning av kummens infiltrasjonskapasitet	43
6.1.3	Forsøk med infiltrometer	43
6.1.4	Analysering av forsøk.....	45
6.1.5	Bestemmelse av K_{sat} -verdi	45
6.2	Sandnes, Multiblokk testfelt	46
6.2.1	Forsøk med vann i infiltrasjonskum	46
6.3	Ytterligere beregninger	49
6.3.1	Infiltrasjonsrate.....	49
6.3.2	Effektivt infiltrasjonsareal og aktuell K_{sat} -verdi.....	49
6.3.3	Kapasitetsberegninger med regnvelopmetoden.....	50
7	Resultater og diskusjon	51
7.1	Trondheim, Tiller.....	51
7.1.1	Infiltrasjonskapasitet fra forsøk i kum	51
7.1.2	K_{sat} -verdi.....	55
7.2	Sandnes, Testfelt til Multiblokk	58
7.2.1	Forsøk med vann i kum.....	58
7.2.2	Ytterligere beregninger av infiltrasjonsrate	61
7.3	Ytterligere beregninger	62
7.3.1	Sammenlikning av infiltrasjonsrate, K-verdi og effektivt sideareal.....	62
7.4	Optimale forsøk	67
7.4.1	Trondheim, Tiller	67
7.4.2	Sandnes, Multiblokk	68
7.5	Andre observasjoner.....	68

7.6	Kapasitetsberegninger	69
7.6.1	Regnenvelopmetode	69
7.7	Dimensjonering	72
7.7.1	Dimensjoneringsmetode	72
7.7.2	Viktige faktorer ved dimensjonering	75
7.8	Dimensjoneringseksempel	76
7.8.1	Eksempel	76
7.8.2	Metode	78
8	KONKLUSJON	79
8.1	Forskningsspørsmål	79
8.2	Videre arbeid	82
9	Referanser	83
10	VEDLEGG	86
10.1	Vedlegg 1	87
10.2	Vedlegg 2	88
10.3	Vedlegg 3	89
10.4	Vedlegg 4	91
10.5	Vedlegg 5	92
10.6	Vedlegg 6	95
10.7	Vedlegg 7	96

FIGURLISTE

Figur 1 Illustrasjon over endring i avrenning, evapotranspirasjon og infiltrasjon som følge av økt urbanisering. Figuren er hentet fra (FISRWG, 1998).	4
Figur 2 Viser endring i nedbørsfeltets hydrograf som følge av urbanisering. Figuren er hentet fra (David Butler, 2011).	5
Figur 3 Figuren viser utviklingen av 1-times nedbør. Dataene er hentet fra Oslo-Blindern og er målt fra 1968-2014. a) viser hvordan den høyeste 1-times nedbørhendelsen øker i volum. b) viser hvordan 1-times nedbør større enn 5 mm øker i antall tilfeller (Norsk Klimaservicesenter, 2015).	6
Figur 4 Figuren viser en økning i hydrografens flomtopp og hvordan ledningskapasiteten øker ved bruk av klimafaktor (Muthanna, 2016).	7
Figur 5 Illustrerer hvordan overvann skal håndteres ved bruk av 3-leddsstrategien (SINTEF Byggforsk, 2012).	9
Figur 6 En løsning for en infiltrasjonsbasert kumløsning (Basal, 2017).	11
Figur 7 Infiltrasjonskum Basal Storm Type 2 (Skjæveland, 2017).	12
Figur 8 IFS-kum. (Basal)	13
Figur 9 Figuren illustrerer hvordan en IFS-kum anlegges i en pukkgøft (Skjæveland, 2017)	14
Figur 10 Illustrasjon over vannstrømning fra overflaten og videre ned i jorden. Figuren viser forskjellen på de ulike begrepene	18
Figur 11 Illustrerer hvordan infiltrasjonskapasiteten avtar når jorden mettes over tid (National Ready Mixed Association, 2011).	20
Figur 12 Hydraulisk konduktivitet. Modifisert av (Brattli, 2009), etter (L. Carlsson, 1984).	25
Figur 13 Flyfoto som viser området og vegen hvor kummene er anlagt (Finn.no, 2017). De røde kryssene illustrerer kummenes plassering.	27
Figur 14 Plantegning som viser de aktuelle kummene det er utført forsøk i (Norconsult, 2014)	28
Figur 15 Utklipp av byggetegning for kummene som er anlagt på Tiller i Trondheim (Norconsult, 2014).	28
Figur 16 Kjeglestump; illustrerer betraktningen av pukkvolumet rundt kummen.	31
Figur 17 Kartutsnitt fra NVEs løsmassekart over det aktuelle området hvor kummene er anlagt (NGU, 2017)	33

Figur 18 Viser et utsnitt fra resultat av boreprøvene for de borehullene som er nærmest de aktuelle kummene det er gjennomført forsøk i (Geoteknisk Seksjon, 1977).	34
Figur 19 Kartutsnitt over området hvor kummen er anlagt, rødt kryss illustrerer kummens plassering (Finn.no, 2017).	35
Figur 20 Plantegning hvor den aktuelle kummen er markert med gult (Cowi, 2014).	36
Figur 21 Figuren er et utklipp fra byggetegningen til infiltrasjonskummen i Sandnes (Cowi, 2014).	36
Figur 22 Sylinder. Illustrerer betraktningen av pukkvolumet rundt kummen.	38
Figur 23 Viser påfylling av vann i infiltrasjonskummen under forsøk.	42
Figur 24 Viser typen MPD-infiltrrometer med tilhørende nettbrett som er benyttet ved forsøket (Upstream Technologies, 2017).	44
Figur 25 Viser alle infiltrrometerene under forsøket, før de fylles med vann.	45
Figur 26 Bilde er tatt fra Multiblokks testfelt i Sandnes under utføring av forsøket.	46
Figur 27 Infiltrasjonskummen det utføres forsøk på, kummen elementer er nummerert.	47
Figur 28 Viser infiltrasjonsraten for hvert gjennomførte forsøk.	51
Figur 29 Utskrift fra programvare som viser resultatene fra forsøket som er utført i Sandnes.	58
Figur 30 Viser hvordan vannstanden i kumme avtar etter at påfyllingen av vann i kummen er stoppet. Bildet er et utklipp og en forstørrelse av figur 29.	62
Figur 31 Diagrammet viser resultatene fra beregninger og utført forsøk i Tiller. Beregninger for alternativ 1.	63
Figur 32 Diagrammet viser resultatene fra beregninger og utført forsøk i Tiller. Beregninger for alternativ 2.	63
Figur 33 Diagrammet viser resultatene fra beregninger og utført forsøk i Tiller. Beregninger for alternativ 4.	64
Figur 34 Diagrammet viser resultatene fra beregninger og utført forsøk i Tiller. Beregninger for alternativ 4.	64
Figur 35 Diagrammet viser resultatene fra beregninger og utført forsøk i Tiller. Beregninger for alternativ 5.	65
Figur 36 Diagrammet viser resultatene fra beregninger og utført forsøk i Sandnes.	66
Figur 37 Infiltrasjonsraten som en funksjon av Ksat-verdi og effektivt infiltrasjonsareal.	77

TABELLISTE

Tabell 1 Tabellen beskriver kummens elementer og deres funksjon.	29
Tabell 2 Beskriver de alternative utformingene av kummens omkringliggende pukkvolument.....	31
Tabell 3 Viser min- og maxverdier for kummens fordrøyningsvolum og infiltrasjonsareal.	32
Tabell 4 Tabellen beskriver kummens elementer og deres funksjon.	37
Tabell 5 Tabellen viser beregnet infiltrasjonsareal for den aktuelle kummen i Sandnes.	38
Tabell 6 Tabellen viser beregnes fordrøyningsvolum for den aktuelle kummen i Sandnes.	39
Tabell 7 Resultater fra infiltrometertester som er gjennomført på feltet (Cowi, 2014)...	40
Tabell 8 Viser resultater for alternative beregnede K-verdier.....	40
Tabell 9 Tabellen viser parametere som er viktige for å bestemme kummens kapasitet.	41
Tabell 10 Tabellen beskriver de ulike elementene i kummen, elementene er nummerert i hht. figur 26 og 27.....	47
Tabell 11 Tabellen viser den totale påfylte vannmengden i løpet av de utførte forsøkene. *Kummen var helt tom før påfylling, dermed vil noe av vannet som fylles på lagres under infiltrasjonsrøret i kummen. Dette vannvolumet trekkes derfor fra det påfylt volumet, ettersom det ikke går ut av kummen.	52
Tabell 12 Viser måleresultatene fra de utførte forsøkene med MPD-infiltrometer.	55
Tabell 13 Tabellen viser resultatet av K-verdien basert på ulike metoder.....	56
Tabell 14 Tabellen viser K-verdiene som benyttes i videre beregninger.....	57
Tabell 15 Tabellen viser påfyllingen i kummen i løpet av forsøket.....	59
Tabell 16 Tabellen viser beregninger for infiltrasjonsraten under påfyllingen i forsøket.	59
Tabell 17 Tabellen viser resultat av beregningene fra regnvelopmetoden.....	70
Tabell 18 Tabellen illustrerer hvordan dimensjonerende nedbørshendelse er omregnet til dimensjonerende volum for ulike varigheter.....	74
Tabell 19 Infiltrasjonsareal for alternativ utforming av kumløsning.	76
Tabell 20 Fordrøyningsvolum for alternativ utforming av kumløsning.	77

1 OPPGAVEN

1.1 Bakgrunn

Infiltrasjonsbaserte løsninger for overvannshåndtering er en anbefalt praksis for å redusere overvannsmengden som føres til fellessystemer, for eksempel som steg 1 av 3-stepsstrategien til Norsk Vann. Prinsippene bak denne strategien handler om å håndtere overvannet så nært kilden som mulig. Å gjenopprette vannbalansen ved infiltrasjon og påfylling av grunnvann er også et viktig aspekt av denne praksisen. Disse løsningene er basert på infiltrasjonspotensialer som vanligvis er klassifisert etter jordtype. I urbane områder er ofte jorden kraftig komprimert og/eller endret på grunn av urbane byggematerialer og fyllinger. Feltnmålinger av infiltrasjonsevne er ofte nødvendig for å angi det faktiske infiltrasjonspotensialet.

Skjævelandgruppen i Sandnes produserer infiltrasjonsbaserte kummer som en løsning for å håndtere overvannet. Slike kummer har som funksjon å samle opp vann fra tette flater og siden infiltrere overvannet lokalt i stedlige masser. Slike kumløsninger kan kjøpes som «hylleware» fra produsent. Produktløsningen er forholdsvis ny og kom først på markedet i 2007. Selv om produktet selges som nesten ferdig løsning er det ingen utbredt enighet i bransjen om hvordan slike løsninger skal dimensjoneres.

1.2 Målsetning og forskningsspørsmål

Målet med denne oppgaven er å bidra med kunnskap knyttet til infiltrasjonskummer, og spesielt belyse nøkkel-faktorer ved dimensjonering og prosjektering av infiltrasjonskummer. For å forstå hvordan anleggene virker, er det gjennomført feltforsøk på 3 eksisterende kummer, såkalte infiltrasjonssandfang. Målet med forsøkene er spesifikt å avdekke kapasiteten til de undersøkte kummene –og, gjennom tolkning av resultater, gi bedre forutsetninger for å utarbeide velegnede metoder for dimensjonering og prosjektering av infiltrasjonssandfang. For å nå målsettingene, er det videre definert tre forskningsspørsmål:

1. Hvordan kan man utvikle og verifisere en metode for kapasitetsmåling av infiltrasjonssandfang?
2. Hva er viktige faktorer ved anlegging av infiltrasjonssandfang?

3. Hvordan kan en dimensjonere et infiltrasjonssandfang for bestemte krav til håndtering av overvann?

1.3 Oppgavens avgrensninger

Følgende avgrensninger er gjort i oppgaven:

- Denne oppgaven omfatter undersøkelse og beskrivelse av en type kumløsning som kalles IFS-kum (infiltrasjonssandfangskum).
- Oppgaven fokuserer på håndteringen av overvannsmengder (volumer), og omhandler ikke hvordan løsningen eventuelt kan påvirke overvannets kvalitet.

2 TEORI OM OVERVANN

2.1 Hydrologi i urbane områder

Overvann, defineres som den mengden regnvann som ikke infiltrerer i grunnen, men renner av på overflaten. Smeltevann kan også betegnes som overvann når det renner på overflaten. Store nedbørshendelser gir store mengder overvann og utfordrer kapasiteten til ledningsnett. Når kapasiteten overstiges, oppstår oversvømmelser, som avhengig av flomveier og sårbarhet til nærliggende bygg og infrastruktur resulterer i kostbare skader. I senere tid har slike flomhendelser skjedd oftere, samtidig som skadene blir mer omfattende og kostbare (NOU, 2015). Dette skjer som en følge av endringer i menneskers bosetningsmønster og forandringer i klima og nedbørsmønster.

Klimatilpasningsutvalget har antatt at kostnadene av alle skader som oppstår på grunn av overvann er mellom 1,6 til 3,6 milliarder kroner årlig (NOU, 2015). I den samme rapporten antydes det at de totale kostandene de neste 40 årene vil nærme seg 100 milliarder. Disse enorme summene tydeliggjør behovet for en strategi for overvannshåndtering hvor målet er å forebygge og begrense skader.

2.1.1 Hydrologisk sirkel

Den hydrologiske sirkelen beskriver hvordan vannet på jorden sirkulerer og kan brukes til å beskrive vannets bevegelse i det globale systemet eller i små nedslagsfelt.

Vannets forhold i forskjellige reservoar kan beskrives med likningen for vannbalansen:

$$N = Q + E \pm \Delta R$$

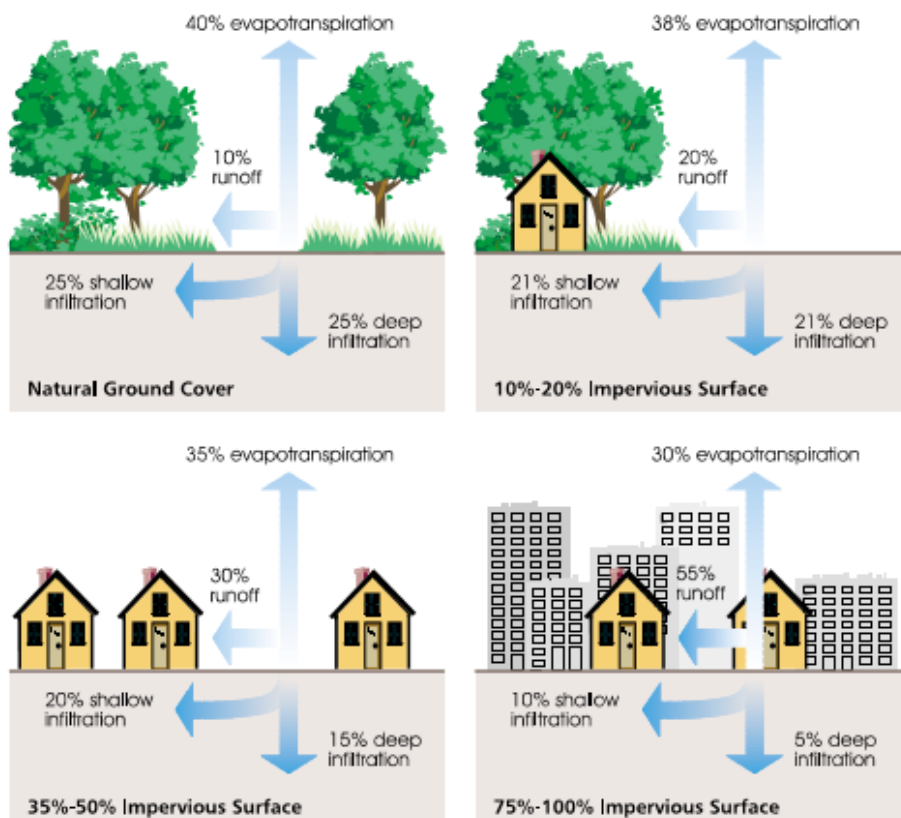
Hvor N er nedbør [mm/døgn , måned, år], Q er avrenning [m^3 , l/s], E er evapotranspirasjon [mm] og ΔR er lagring.

(Brattli, 2009)

2.1.2 Urbanisering

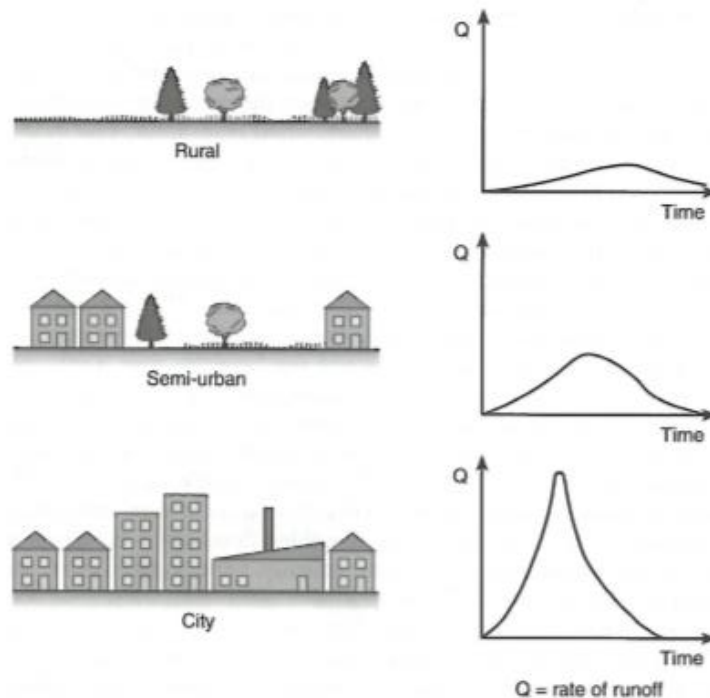
Urbanisering er et begrep som omfavner menneskers og virksomheters flytning fra landlige områder til byene. Dette er en tendens som skjer over hele verden. I 2014 bodde 54% av jordens befolkning i byer, i 1950 bodde kun 30% i byer og i 2050 forventes 66% av befolkningen å bo i byer. I Europa er tallet høyere og allerede i 2014 bodde hele 73% i urbane områder (United Nations, 2015). Statistisk sentralbyrå opplyser at 81 % av Norges befolkning bor per 1. januar 2016 på tettsteder, samtidig øker tilflyttingen til tettsteder (SSB, 2016).

Som Leopold beskrev allerede i 1968, og som mange har bekreftet etter han (David Butler, 2011), vil den hydrologiske sirkelen påvirkes av urbanisering (Leopold, 1968). Grønne områder med naturlig vegetasjon fordrøyer og infiltrerer store mengder vann. Når disse områdene erstattes av ikke-permeable flater, som tak, parkeringsplasser og veier, blir avrenningsmønsteret fra området endret. Figur 1 illustrerer endringer i avrenning og infiltrasjon som følge av urbanisering.



Figur 1 Illustrasjon over endring i avrenning, evapotranspirasjon og infiltrasjon som følge av økt urbanisering. Figuren er hentet fra (FISRWG, 1998).

Slik som figur 1 illustrerer kan enkelte utbygde områder få en avrenning som er større en 50% av regnhendelsen (Department of Environmental Resources, 1999). Mengden avrenning blir større, samtidig som responstiden til feltet blir kortere. Dette fører til at feltets hydrograf endres. Den totale mengden overvann øker, og på grunn av raskere responstid øker spissvannføringen enormt. Denne endringen er illustrert i figur 2.



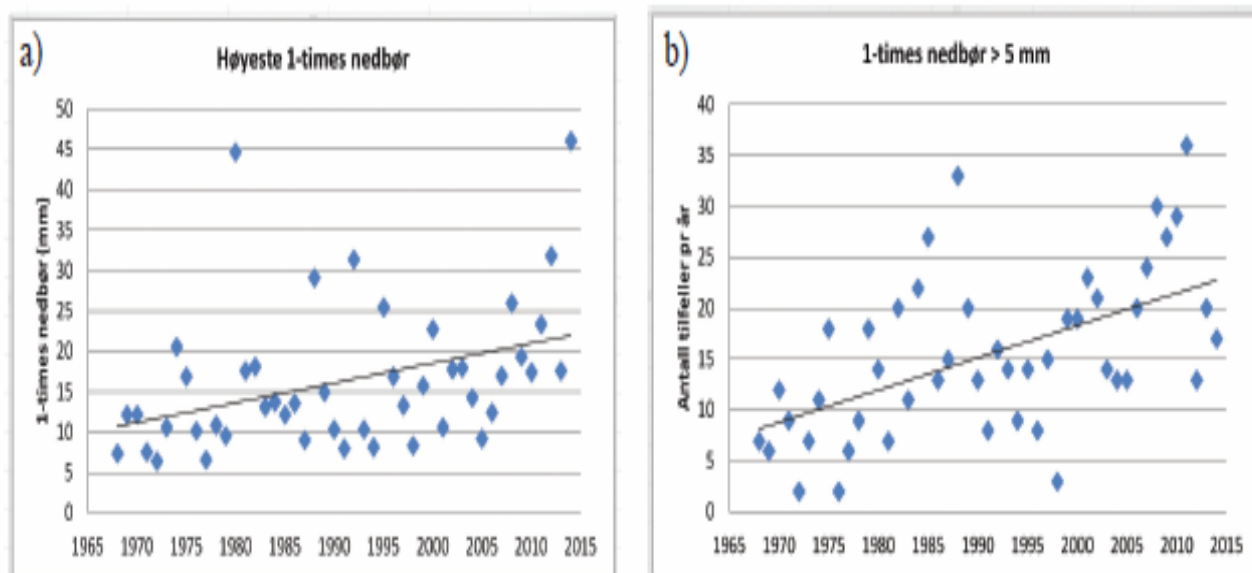
Figur 2 Viser endring i nedbørsfeltets hydrograf som følge av urbanisering. Figuren er hentet fra (David Butler, 2011).

Forandringer i avrenningsmønster med større spissvannføringer øker risikoen for flere flomhendelser. Økt hastighet på vannet fører til mer erosjon. Økte avrenninger i urbane områder forverrer ofte vannkvaliteten, og følgende blir resipienten utsatt for større forurensninger. Dette kan være ødeleggende for både økologi og biologi i bynære vassdrag (Department of Environmental Resources, 1999). Denne oppgaven fokuserer imidlertid på kvantiteten av overvann.

Når den naturlige infiltrasjonen i et område avtar kan vil det føre til mindre perkolering og redusert påfylling av grunnvannet. Dette påvirker den hydrologiske sirkelen og kan føre til et synkende grunnvannsspeil. Det lokale grunnvannet er ofte det som fyller lokale vannstrømmer i tørre perioder. En redusert grunnvannsstand kan føre til reduksjon i tilsig i lokale vassdrag og dermed forstyrre den lokale næringskjeden (Department of Environmental Resources, 1999).

2.1.3 Klima

Også klimaendringer er med på å øke de største vannføringene av overvann. Forskning på fremtidens klima indikerer at fremtidens klima vil være preget av større mengder nedbør. Årlig nedbør er forventet å øke med mellom 7-23% ulike steder i Norge fram mot slutten av århundret. Særlig blir det flere og mer intense nedbørshendelser. I følge Klima i Norge 2100 er det en tendens at nedbørshendelser på 1 time har en klar økning i både intensitet og hyppighet. Fra pluviometerstasjoner med lange måleserier er det observert at de kraftigste regnbygene i løpet av 1-24 timer har økt i intensitet fra 1961-2010. Figur 3 viser hvordan målt 1-times nedbør ved Oslo-Blindern øker i både intensitet og hyppighet fra 1968-2014. Stigende trendlinje viser økningen i både grafen for intensitet og i grafen for hyppighet (Norsk Klimaservicesenter, 2015).



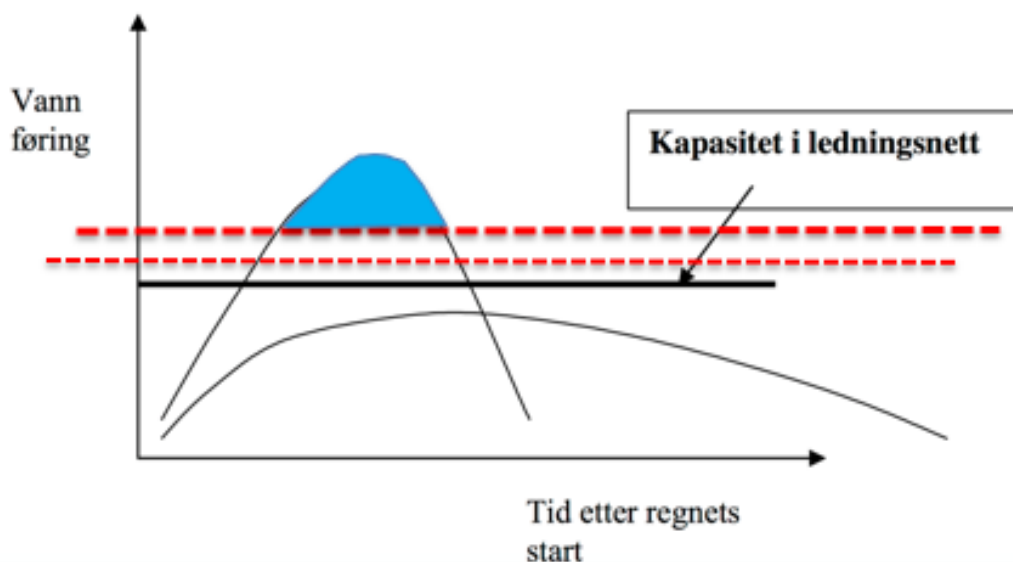
Figur 3 Figuren viser utviklingen av 1-times nedbør. Dataene er hentet fra Oslo-Blindern og er målt fra 1968-2014. a) viser hvordan den høyeste 1-times nedbørhendelsen øker i volum. b) viser hvordan 1-times nedbør større enn 5 mm øker i antall tilfeller (Norsk Klimaservicesenter, 2015).

2.1.4 Klimafaktor

For å kompensere for økt nedbør er det i mange norske kommuner innført en klimafaktor. Denne faktoren benyttes i dimensjoneringer og skal ta høyde for den fremtidige økningen i nedbør. Trondheim kommune benytter en klimafaktor på 1,2, mens Oslo kommune gjør tiltakshaver ansvarlig for valg av klimafaktor på bakgrunn av skadepotensial og tiltakets

forventede levetid. Statens vegvesen bestemmer klimafaktor avhengig av forventet levetid til sine utbygginger, ved en forventet levetid på 10 år benyttes klimafaktor på 1,3 (Statens Vegvesen, 2014). De regionale klimaprofilene, som er det siste nasjonale anslaget på klimafaktor per nå, anbefaler nå at det benyttes en faktor på minst 1,4 ved regnvarighet kortere enn tre timer (Norsk Klimaservicesenter, 2015).

Klimafaktor benyttes også for dimensjonering av ledningsnett. Men det er særlig de korte og intense regnhendelsene som er utfordrende for kapasiteten i ledningsnett. Slike hendelser gjør at spissvannføringen blir mange ganger større enn den gjennomsnittlige vannføringen. Figur 4 illustrerer hvordan ledningsnettets kapasitet kan økes med både 10% og 20%, men likevel er ikke kapasiteten god nok for å ta unna flomtoppen.



Figur 4 Figuren viser en økning i hydrografens flomtopp og hvordan ledningskapasiteten øker ved bruk av klimafaktor (Muthanna, 2016).

Å dimensjonere rør for de store flomtoppene er meget kostbar. En slik dimensjonering ville medført store utbygginger og et enormt behov for oppgraderinger av eksisterende ledningsnett. Dette er et intensiv for å se på andre løsninger for håndteringen av overvann.

2.2 Krav til håndtering av overvann

Tidligere var det vanlig å håndtere overvann ved å frakte det raskest mulig bort fra skadeutsatte områder, noe som i praksis betydde at alt overvannet ble ledet inn i rør. Slike gamle overvannssystemer, ofte kombinert med avløpssystemer, er sjeldent dimensjonert for dagens arealbruk eller nåtidens nedbørshendelser (SINTEF Byggforsk, 2012). Dette gjør at kapasiteten stadig overstiges, store vannmengder sendes i overløp og oversvømmelser oppstår. Slike oversvømmelser kan skape store og kostbare skader på miljø og bebyggelse. Dessuten kan oversvømmelser i fellesanlegg føre til smittefare, og store mengder overløp fra fellesanlegg kan påvirke resipienten negativt (NOU, 2015). Derfor bør oversvømmelser så langt det lar seg gjøre forebygges.

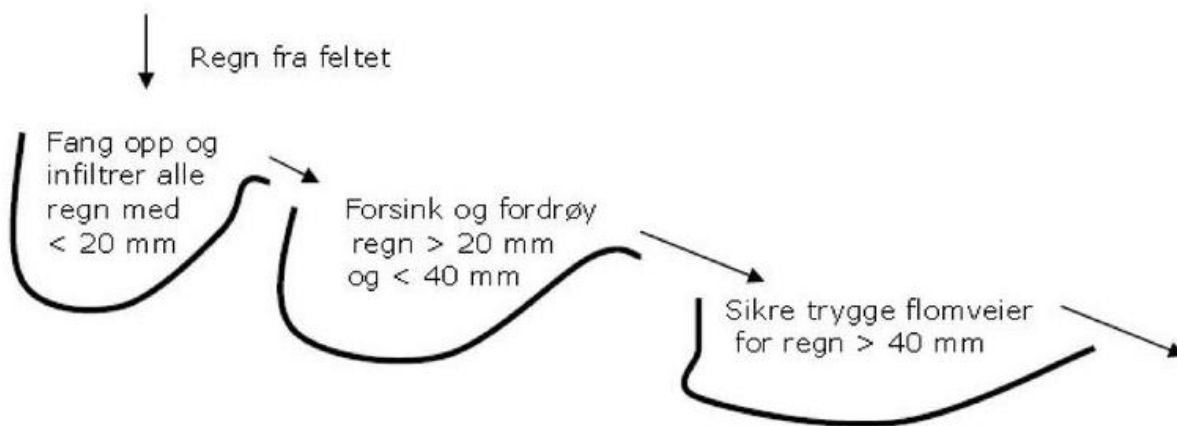
I dag krever pbl (Plan- og bygningsloven) og TEK10 (Byggteknisk forskrift) at grunnvann og overflatevann skal «avledes på en måtes om ikke fører til oversvømmelse eller andre ulemper ved dimensjonerende regnintensitet». Videre kreves det at vannet skal håndteres lokalt, så langt det lar seg gjøre (SINTEF Byggforsk, 2012). Dagens anbefalinger for håndtering av overvann skal være med på å minske belastningen på avløpsnett, pumper og avløpsrensaneanleggene. Framtidens overvannshåndtering må være bærekraftig, og dette oppnås best ved å håndtere overvannet lokalt. Dette gjøres ved å innføre flere små løsninger som håndterer overvannet hvor det oppstår, og omtales som lokal overvannshåndtering (LOH) eller lokal overvannsdiskonering (LOD). Tiltak som sikrer lokal håndtering av overvannet, tilstreber å opprettholde/gjenskape den naturlige vannbalansen i det aktuelle området (Ødegaard, 2012).

2.2.1 3-leddsstrategi

Lokale myndigheter må fokusere på helheten ved overvannshåndtering og betrakte det som et sammensatt system. Implementering av nye løsninger for håndtering av overvann må være tilpasset lokale forhold. Et godt tilpasset overvannssystem vil redusere behovet for kostbare utbygginger av ledningsnett. En 3-leddsstrategi for håndtering av overvann er presentert i Norsk Vanns veileder for overvannshåndtering (Oddvar Lindholm, 2008). Strategiens tre ledd innebærer forskjellig håndtering avhengig av mengden regn og innebærer disse tre stegene:

1. Fang opp og infiltrer
2. Forsink og fordrøy
3. Sikre trygge flomveier

Figur 5 nedenfor illustrerer 3-leddsstrategien. Avhengig av lokale forhold må mengdene i 3-leddsstrategien tilpasses, tallene i figuren er kun til illustrasjon.



Figur 5 Illustrerer hvordan overvann skal håndteres ved bruk av 3-leddsstrategien (SINTEF Byggforsk, 2012).

For å oppnå den mest optimale håndteringen av overvann bør dimensjonerende regnhendelser anslås av den aktuelle myndighet i kommunen. Valget bør være basert på en samfunnsøkonomisk og bærekraftig vurdering, hvor hele systemet er vurdert i et livstidsperspektiv (Oddvar Lindholm, 2008).

Den optimale håndteringen av overvann vil innebære å finne en løsning som i størst mulig grad gjør at hydrologien i det utbygde området er lik den hydrologiske balansen i området slik det var før utbygging. Å forsøke å gjenskape den opprinnelige og naturlige hydrografen i området vil redusere negative påvirkninger på hydrologien i området, som ellers ville fulgt av utbyggingen (Ødegaard, 2012).

Videre følger fordeler ved å håndtere overvannet lokalt, som nevnt i rapporten «Overvann som ressurs» (Asplan Viak AS, 2014):

- Flom

Ledningsnettets kapasitet er begrenset. Nye utbygginger øker andelen tette flater og øker avrenningen. For at mengden overvann som tilføres, i mange tilfeller, et allerede sterkt

belastet overvannsnett ikke skal føre til nedstrøms overbelastning og oversvømmelser er det fordelaktig at overvannet håndteres på andre måter.

- Biologi

Vann er en viktig del av mange habitat, og å lede vannet bort fra overflaten og inn i rør kan skade habitatene. Åpen overvannshåndtering kan derfor være med på å opprettholde biologien i nedslagsfeltet. Tilgang på vann vil opprettholde vegetasjon og dyre- og fugleliv i områder.

- Vannbalanse

Som nevnt tidligere vil tette flater hindre infiltrasjon, det samme gjelder for rørløsninger som frakter vannet raskt til nærmeste resipient. Reduksjon av infiltrasjon fører til reduksjon i påfylling av grunnvannet i nedbørsfeltet. Dette har flere negative konsekvenser, det kan blant annet bli kritisk for tilgangen på rent vann i områder hvor vann er mangelvare.

- Rekreasjon

Vannspeil og vann som strømmer oppfattes som et pent bidrag i landskap. Det er med på å opprettholde vegetasjon, samt dyre- og planteliv i området.

- Økonomiske løsninger

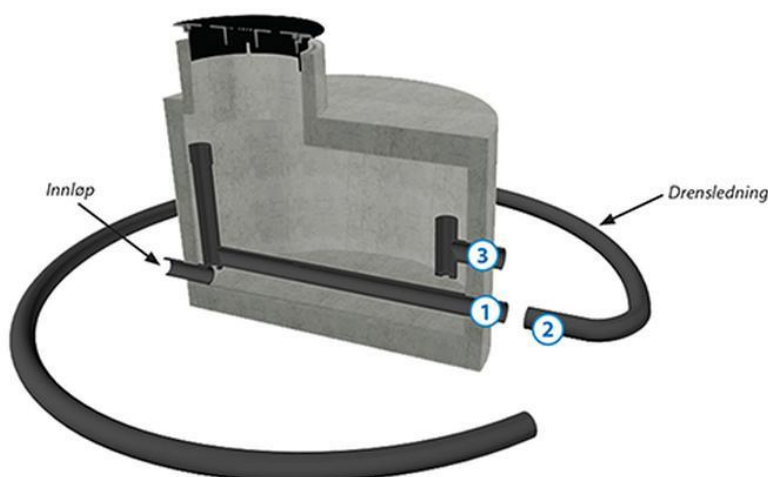
Å etablere løsninger som ikke krever store grøfter og røranlegg kan i mange tilfeller være både billigere å bygge og drifte. Ved store vannmengder er ofte åpne løsninger rimeligst, samtidig har de størst reservekapasitet, og hindrer derfor flere oversvømmelser. At overvannet håndteres på andre måter enn ved tradisjonell rørføring, minsker mengden vann som transporteres. Mengden vann som når renseanleggene vil også reduseres. Dette vil redusere energikostnadene for pumpesystemene og avløpsrenseanleggene.

- Rensing

Overvann er i mange tilfeller forurenset, særlig overvann fra landbruksområder og byområder. Forurensningene er typisk næringsstoffer, miljøgifter, tungmetaller og salt. Mange løsninger for lokal overvannshåndtering innebærer prosesser som i varierende grad renses vannet. Dette er ikke noe videre tema for denne oppgaven.

3 INFILTRASJONSKUMMER

Som vist i figur 1 avtar den naturlige infiltrasjonen når områder urbaniseres. Det finnes flere tekniske LOD-tiltak som gjenskaper infiltrasjonen. En av disse løsningen er infiltrasjonsbaserte kumløsninger. En infiltrasjonskum er en kum hvor infiltrasjon inngår som en enhetsprosess. Det finnes flere løsninger for å anlegge en såkalt infiltrasjonsbasert kumløsning. Basal har flere standardiserte løsninger. En løsning er illustrert i figur 6.



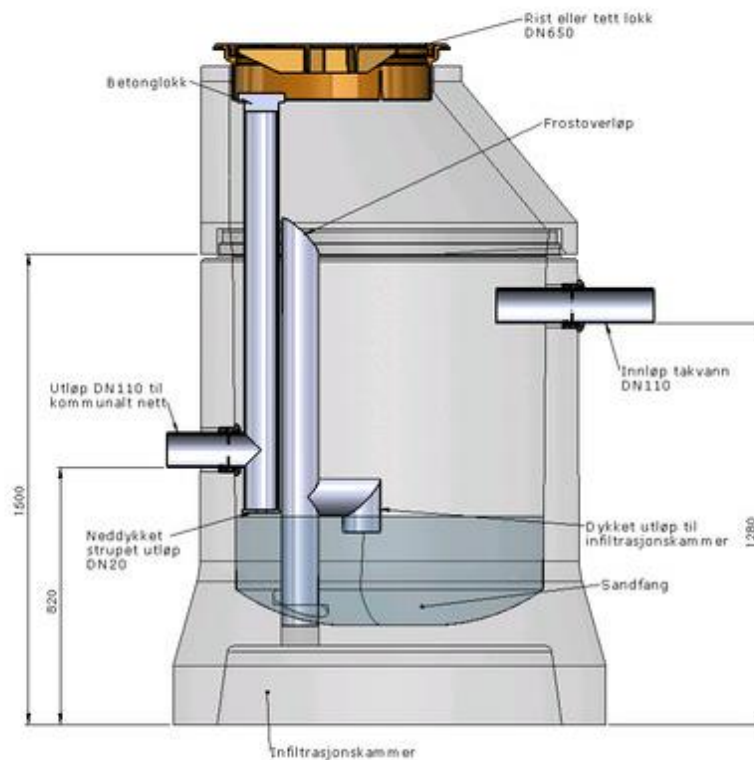
Figur 6 En løsning for en infiltrasjonsbasert kumløsning (Basal, 2017).

Kummen er en del av Storm-serien til Basal og løsningen er ment for utbyggere hvor området har en begrenset andel med ikke-permeable flater. Kummen har et innløp hvor alt overvannet fra det aktuelle området fraktes inn i kummen. Utløpet på kummen kan reguleres slik at videreført vannmengde til det kommunale ledningsnett overholder kravene. Avhengig av høyden på utløpet og kummens innvendige diameter har kummen i seg selv en fordrøyningsfunksjon. Ved å åpne et rør mot de stedlige massene rundt kummen, illustrert med et 1-tall i figur 6, kan noe av vannmengden infiltreres. Om en kobler en perforert drensledning (illustrert med et 2-tall i figur 6) på utløpet vil arealet som er tilgjengelig for infiltrasjon øke og den totale infiltrasjonskapasiteten bedres. 3-tallet på figuren er kummens utløp (Basal, 2017).

Det stilles spørsmål til gjentetting av drensledningen og eventuelt vedlikehold av denne. Ettersom kummen ikke har noe slamvolum eller noen form for rensing av overvannet før det føres til kummen, -vil partikler av ulike størrelser kunne føres inn i drensledningen.

Slike partikler kan tette igjen både røret og infiltrasjonsarealet over tid. En slik løsning forutsetter derfor ofte at en har et sandfang, eller tilsvarende løsning, oppstrøms infiltrasjonskummen.

Basal har en annen løsning som heter Basal Storm Type 2, illustrert i figur 7. Denne kummen er nesten tilsvarende kummen nevnt ovenfor, men det finnes et sandfangsvolum i bunnen av kummen. Overvannets partikler sedimenterer i bunn slik at utfordringer med gjentetting av infiltrasjonsarealet eller det perforerte røret reduseres. Sandfanget må vedlikeholdes jevnlig ved tømning (Skjæveland, 2017). Etersom disse kummen ikke er fokuset i denne oppgaven analyseres ikke deres kapasitet, funksjon, fordeler eller ulemper noe nærmere.



Figur 7 Infiltrasjonskum Basal Storm Type 2 (Skjæveland, 2017).

I denne oppgaven er Basal IFS-kummen (infiltrasjonssandfang) studert nærmere. Illustrasjon av kummen finnes i figur 8 og 9.



Figur 8 IFS-kum. (Basal)

Figur 9 illustrerer hvordan en slik kumløsning kan anlegges. Kummen settes på en pukkgutte og omfylles med pukk. Pukkmagasinet fungerer som et fordrøyningskammer før vannet infiltrerer til inn i de stedlige massene. Kumløsningen er utformet med en hulrom under kummen, markert som fordrøyningskammer i figur 9. Dette kammeret optimaliserer hydraulikken i fordrøyningen. Hulrommet gir vannet en god fordeling på overflaten av pukkgutten kummen står på. Fordelingen er viktig for spre vannet på et størst mulig areal av pukken og dermed aktivere et størst mulig volum. Denne fordelingen øker sannsynligvis utløpskapasiteten på infiltrasjonsrøret.



Montering av IFS-sandfang

Figur 9 Figuren illustrerer hvordan en IFS-kum anlegges i en pukkgøft (Skjæveland, 2017).

Vanntrykket inne i pukkmagasinet vil ikke kunne overstige vanntrykket inne i vannkummen. I praksis betyr det at den maksimale høyden for vannstanden i pukkmagasinet er lik den maksimale høyden for vannstanden inne i kummen. Den maksimale vannstandshøyden inne i kummen vil for de fleste tilfeller være lik høyden på bunnen av overløpet.

Det er utført forsøk på tre ulike infiltrasjonssandfang i denne oppgaven. De tre infiltrasjonssandfangene er bygget forholdvis likt. De aktuelle infiltrasjonssandfangene beskrives ytterligere i kapittel 5 «Beskrivelse av forsøksfelt».

Fiberduk

Infiltrasjonssandfanget i Sandnes er anlagt med fiberduk mellom stedlige masser og pukkmagasinet. Hvorvidt dette påvirker infiltrasjonsevnen er usikkert. Såfremt filterduken har en større permeabilitet enn infiltrasjonsevnen til de stedlige massene, er det rimelig å tro at duken ikke vil være noen begrensende faktor (Geosyntia AS, 2016). Fordelen med fiberduk er at den forhindrer stedlige masser og pukken å blandes (Geosynita AS, 2016). Etter en tid vil finstoffene som finner vei inn i pukkmagasinet legge seg på innsiden av fiberduken. Når dette reduserer infiltrasjonskapasiteten betraktelig må vedlikehold utføres. Ved bruk av fiberduk vil det være nødvendig å grave opp hele konstruksjonen og erstatte fiberduken med en ny. Om det ikke benyttes fiberduk vil det medføre at overflaten av de stedlige massene tettes igjen og dermed må byttes.

3.1.1 Fordeler

- Arealeffektivt

En fordel med infiltrasjonsbaserte kumløsninger er at infiltrasjonen finner sted under bakken. Infiltrasjonsarealet krever dermed ingen plass utover kumlokket på overflaten. Andre infiltrasjonsløsninger hvor vannet infiltrerer fra overflaten og ned i grunnen setter ofte begrensninger til bruk av arealet hvor infiltrasjon skjer. At løsningen er arealeffektiv er en stor fordel i urbane områder, hvor plass ofte er mangelvare. Løsningen kan for eksempel benyttes til å fordrøye og infiltrere avrenning fra veier i trange gater.

- Frostsikkert

Ettersom sandfang anlegges på en frostfri dybde vil store deler av infiltrasjonsarealet og pukkvolumet ligge på frostfri dybde. Dette er en stor fordel, særlig i kalde klima.

Infiltrasjonskapasiteten til jord synker betydelig når det er tele i jorden (Kim H. Paus, 2016). Dette gjør at infiltrasjonsbaserte anlegg fungerer dårlig i vinterhalvåret. Siden den aktuelle løsningen ligger frostfritt vil infiltrasjonskapasiteten og driftssikkerheten være god også i vinterhalvåret.

- Sandfang og dykker

Når overvann renner på overflaten, særlig i urbane områder, frakter det med seg mye sedimenter, partikler og finstoff. Mange studier har vist at når partiklene og særlig finstoffet fraktes med vannet inn i infiltrasjonsanlegg tetter det igjen infiltrasjonsflaten og reduseres over tid kapasiteten betraktelig (M. Bergman, 2011). Å redusere mengden partikler som når infiltrasjonsflaten vil redusere/forsinke behovet for vedlikehold. Ved å installere et sandfang som en del av infiltrasjonsløsningen vil partikler bunnfelle i sandfanget og dermed hindres å nå infiltrasjonsarealet. At infiltrasjonsrøret er utformet som en dykker hindrer finstoff og andre flytepartikler som ligger i overflaten å nå infiltrasjonsflaten. Sandfanget krever vedlikehold i form av jevnlig tømning for å fungere optimalt. Å tømme sandfang er derimot en enkel rutineoppgave for driftspersonell, sammenlignet med å grave opp hele pukkvolument og for eksempel bytte fiberduk.

3.1.2 Ulemper

- Betong

Kummene lages av betong, et materiale med stort CO₂-fotavtrykk. Produksjonen av sement til betong krever mye energi, men til gjengjeld er det ferdige produktet robust og har lang levetid.

- Turbulente strømningsforhold

Ved intense nedbørshendelser kan vannmengden som strømmer inn i kummen, både fra eventuelle innløpsrør og fra kumløkket/ristløkket være betydelig. Vannmengden entrer vannspeilet i kummen med stor hastighet og skaper turbulente strømningsforhold. Turbulent strømming kan i mange tilfeller føre til at sedimentene i sandfanget rives opp og fraktes med vannstrømmen. Sedimentene fraktes da med vannstrømmen og havner i pukkmagasinet eller i det kommunale ledningsnett om vannet går i overløp. For å redusere risikoen for at intense nedbørshendelser bidrar til å tette igjen infiltrasjonsarealet, er det viktig å tømme sandfanget ofte. Storm Aqua jobber for tiden

med en løsning for en energidreper i kummen, som skal redusere energien på vannet som strømmer inn i kummen og dermed redusere turbulens.

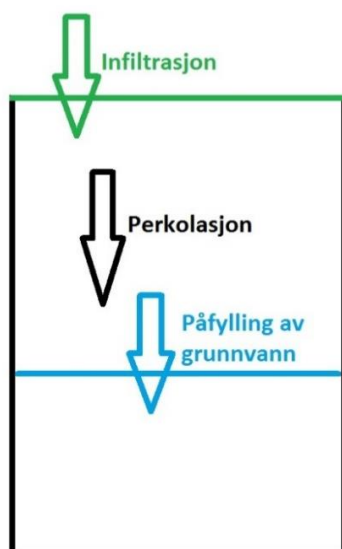
- Kunnskap

Infiltrasjonskummer er en forholdsvis ny løsning for håndtering av overvann. Det finnes lite litteratur om løsningen, og det finnes per nå ingen anerkjent entydig metode i bransjen for dimensjoneringen av en slik løsning. Gode rutinger for tømning av sandfanget må også utarbeides på bakgrunn av erfaringer. Hvordan infiltrasjonskapasiteten avtar etter hvert som infiltrasjonsarealet tettes igjen er vanskelig å forutsi, og dermed blir det vanskelig å sette forventet levetid på konstruksjonen. Mer erfaring og forskning må til for å finne den optimale bruken av denne løsningen.

4 TEORI INFILTRASJON OG PERKOLASJON

Infiltrasjon er en prosess hvor vann fra overflaten trenger ned i porene i jorden. Infiltrasjonskapasiteten til en jordsort defineres som raten vann infiltrerer inn i jorden og oppgis ofte i som infiltrasjonsrate og med en enhet som beskriver strekning per tid (David Butler, 2011). Infiltrasjonsprosessen er en viktig del av den hydrologiske sirkelen, ettersom det bidrar til fylling av grunnvannet. Vannvolumet som infiltrerer er avhengig av mengden vann som kommer fra nedbørshendelsen, stedlige egenskaper og jordas tilstand (Alfredsen, 2015).

Begrepet infiltrasjon brukes også ofte om vannets bevegelse i umettet sone, ned mot mettet sone, men perkolasjon er et mer spesifikt begrep for denne vannstrømningen. Forskjellen mellom infiltrasjon og perkolasjon er illustrert i figur 10. Infiltrasjon og perkolasjon er to prosesser som henger sammen, og som er avhengige av hverandre. For at perkolasjon skal skje, er en avhengig av tilførsel av vann. Dette vannet tilføres via infiltrasjon. Igjen, for at infiltrasjon skal kunne opprettholdes over tid er en gjensidig avhengig av perkolasjon. Inntil alle underliggende masser er fullstendig mettet vil raten av perkolasjon være avgjørende for infiltrasjonsraten (Alfredsen, 2015). Siden disse to prosessene henger sammen, og vil være avgjørende faktorer for kapasiteten for infiltrasjonsbasert overvannshåndtering, er de videre utdypet i dette kapitlet.



Figur 10 Illustrasjon over vannstrømning fra overflaten og videre ned i jorden. Figuren viser forskjellen på de ulike begrepene.

4.1 Jordens egenskaper

Jord er et porøst medium. Det er jordens porer som gjør det mulig for vannet å trenge gjennom jorden og muliggjør infiltrasjon. Vannstrømningen i jorden er avhengig av porøsiteten. Porøsitet beskriver andelen hulrom i mediet. Disse hulrommene kan romme enten luft eller vann og er avgjørende for infiltrasjonskapasiteten. Porøsitet defineres kan beskrives som n , slik:

$$n = \frac{V_a + V_w}{V_s}$$

Hvor $V_a [m^3]$ er volumet av luft, $V_w [m^3]$ er vannets volum og $V_s [m^3]$ er det totale volumet av jorden.

Jordas kornfordeling, kornstørrelse, kornform og komprimering vil påvirke porøsiteten. En dårlig sortert jord, med stor spredning i kornfordelingen vil ha mindre porøsitet enn en dårlig sortert jordsort. Når kornfordelingen er stor kan de minste fraksjonene fordele seg og tette hulrommene i jorden. Med liten variasjon i kornfordelingen vil hulrommene mellom kornene være større og porøsiteten blir dermed høy (Brattli, 2009).

Det er vanlig å skille mellom total og effektiv porøsitet. Ikke alle porene i et medium vil til enhver tid være tilgjengelig for gass eller væsker. Den effektive porøsiteten beskriver porene som er tilgjengelig. Den effektive porøsiteten tilsvarer volumet av vann eller gas som kan bevege seg fritt gjennom mediet. Effektiv porøsitet er beskrevet som n_{eff} (Tarboton, 2003).

$$\text{Effektiv porøsitet} = n_{eff}$$

Hvor effektiv porøsitet er $n_{eff} [m^3]$.

Vanninnholdet i jorden kan beskrives som forholdet mellom jordvolum og vannvolum i massene.

$$\theta = \frac{V_w}{V_s}$$

Der vanninnholdet er $\theta [-]$, $V_w [m^3]$ er volumet av vann og $V_s [m^3]$ er det totale volumet av jorden.

Jordens vanninnhold vil variere over tid, og er stedsavhengig. Vanninnholdet vil være i området mellom 0 og 100%, som vil være mellom helt tørr og totalt mettet masse. Vanninnholdet kan derfor også beskrives som metningsgrad.

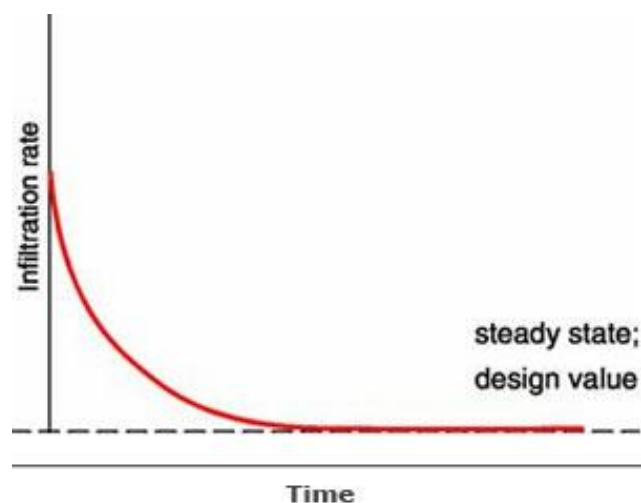
$$\text{Metningsgrad, } S = \theta/n$$

Hvor $S [-]$ er metningsgrad, $\theta [-]$ er vanninnholdet og $n [-]$ er porøsiteten.

(Alfredsen, 2015)

4.2 Infiltrasjon

Jord har en begrenset evne til å infiltrere vann. Kapasiteten og evnen til å infiltrere vann vil blant annet variere mellom ulike jordtyper og mellom ulike tilstander for den samme jordtypen. Tørr jord gir normalt størst infiltrasjon, og infiltrasjonsraten avtar med metningen av jorden. Spenninger mellom jordpartiklene på overflaten og vannet gjør at vannet trekkes nedover i jorden, gjennom kapillære passasjer i jorden. Disse spenningene avtar når jorden mettes med vann og reduserer derfor infiltrasjonskapasiteten over tid. Kolloidale partikler sveller når de mettes med vann, og reduserer kapillære passasjer og dermed jordens evne til å infiltrere vann. Etter en tid vil infiltrasjonen nå et tilnærmet konstant minimumstadije (Brattli, 2009). Figur 11 viser hvordan en typisk infiltrasjonsrate avtar over tid, og når en stabil minimumsgrense. Figuren viser også hvordan den stabile infiltrasjonsraten benyttes som den dimensjonerende verdien.



Figur 11 Illustrerer hvordan infiltrasjonskapasiteten avtar når jorden mettes over tid (National Ready Mixed Association, 2011).

4.2.1 Formelverk for infiltrasjon

Det finnes flere ulike formler for å beskrive infiltrasjon. Horton, Philip og Green-Ampt er alle formler som beskriver infiltrasjonsraten som en funksjon av tiden (Alfredsen, 2015).

Horton

Horton er en empirisk formel for å beskrive funksjonen for infiltrasjon over tid.

$$f_t = f_c + (f_0 - f_c)e^{-k_2 t}$$

Hvor f_t er infiltrasjonsraten ved tiden t [cm/t], f_c er den stabile infiltrasjonsraten [cm/t], f_0 er den første infiltrasjonsraten [cm/t] og k_2 er en avtakende konstant [-].

Horton er gjeldende når nedbørintensiteten er større enn den stabile infiltrasjonsraten. Dette fordi infiltrasjonen ikke kan være større enn tilført vannmengde. Verdier for f_c , f_0 og k finnes i tabeller, hvor verdiene er bestemt ut fra overflatejordas egenskaper. Alle verdier for beregning av infiltrasjon ved bruk av Horton hentes altså fra tabell, imidlertid forutsetter tabellen at jordtypen i det aktuelle området er klassifisert.

Philip

For å beregne infiltrasjonsraten ved bruk av Philip inngår flere beregninger.

1. Tid til kompresjon, $f(t_{cp})$

$$f(t_{cp}) = w: t_{cp} = \left[\frac{S_p}{2(w - K_p)} \right]^2$$

2. Tid til gropmagasinering, (t_{pp})

$$t_{pp} = F(t_{cp})/w$$

$$t_{pp} = \left[\frac{S_p t_{cp}^{1/2} + K_p t_{cp}}{w} \right]$$

3. Infiltrasjonsrate

$$f(t) = t - t_{pp} + t_{cp}$$

4. Tidsjustering

$$f(t) = t - t_{pp} + t_{cp}$$

Hvor S_p er jordens soropsjonsevne [$\text{cm}/t^{1/2}$], w er nedbørshendelsen [cm/t] og K_p er den hydrauliske konduktiviteten [cm/t].

Green-Ampt

Også i Green-Ampt inngår flere beregninger for å komme fram til infiltrasjonsraten.

1. Tid til gropmagasinering

2. Infiltrasjonsrate
$$t_p = \frac{K_h^* |\psi_f| (\varphi - \theta_0)}{w(w - K_h^*)}$$

$$f(t) = K_h^* \left[1 + \frac{|\psi_f| (\varphi - \theta_0)}{F(t)} \right], t_p \leq t \leq t_w$$

3. Tid til $F(t)$

$$t = \frac{F(t) - F(t_p)}{K_h^*} + \frac{|\psi_f| (\varphi - \theta_0)}{K_h^*} * \ln \left(\frac{F(t_p) + |\psi_f| (\varphi - \theta_0)}{F(t) + |\psi_f| (\varphi - \theta_0)} \right) + t_p$$

Hvor Ψ er den våte frontens kapillærsug [-], θ er vanninnholdet [-], K er den hydrauliske ledningsevnen [cm/t], $F(t)$ er den kumulative dybden av infiltrasjon [cm] og φ er porøsiteten [cm/t].

De tre overstående formlene inneholder alle inngangsdata som det er vanskelig å sette gode verdier på uten videre utredninger og kompliserte målinger i felt. Oppgavens mål er å komme fram til en måte å dimensjonere infiltrasjonssandfang for håndtering av overvann. Det er ønskelig at dimensjoneringsmetoden er enkel å anvende, og forholder seg til variabler som er enkle å beregne eller måle i felt. Dette vil gi beregningene gode resultater, og utelukke feilkilder. Horton, Philip og Green Ampt er alle formler som beskriver infiltrasjonsprosessen. Ettersom infiltrasjon ikke er den fysiske prosessen som skjer i løsningsene, men perkolasjon, benyttes ikke formlene til videre beregninger.

4.3 Perkolasjon

Som nevnt tidligere forveksles ofte begrepene perkolasjon og infiltrasjon. Kumløsningsen som oppgaven omhandler kalles for et infiltrasjonssandfang, men «infiltrasjonsprosessen» i kumløsningen skjer mellom pukkmagasinet og de stedlige massene. Ettersom prosessen ikke skjer fra overflaten og prosessen egentlig er

vannstrømning i porøse masser, vil perkolasjon være et mer riktig begrep for å beskrive kummens prosess. Den totale kumløsningen håndterer vannet fra overflaten og frakter det ned i bakken, en total prosess som kan samsvare med infiltrasjon.

Det kan altså argumenteres for at prosessen som skjer når vann trenger inn i de stedlige massene er perkolasjon, men at hele prosessen under ett kan sammenlignes med infiltrasjon. Videre i oppgaven benyttes begrepet infiltrasjon, for å samsvare med aktuelle produktets navn som er infiltrasjonssandfang. Perkolasjon er nok et mer riktig begrep for prosessen som skjer mellom pukkvolumet og de stedlige massene.

4.3.1 Formelverk for perkolasjon

Van Genuchten

En velkjent formel som ofte benyttes for å beskrive strømninger i porøse medier, perkolasjon, er den parametriske modellen van Genuchten. Formelen beskriver en kurve for jordens fuktighetskarakteristikk, også kalt vannretensjonskurve. Jordens vannretensjonskurve er definert som forholdet mellom jordens vanninnhold og jordens hydrauliske potensial og er en viktig fysisk egenskap ved jordmaterialet. Vannretensjonskurven benyttes ofte når en studerer vannets strømninger i umettet sone (Xu Yang, 2013).

Den parametriske modellen for effektiv metningsgrad, van Genutchen:

$$\theta = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} = \left[\frac{1}{1 + (\alpha\psi_m)^n} \right]^m$$

Hvor θ er effektiv metning [-], θ_r er gjenværende vanninnhold [-], θ_s er mettet vanninnhold [-], Ψ_m er matrisk potensial [cm], α beskriver den inverse luftinnsugingen [cm⁻¹] og n [-] og m [-] er parametere som er direkte avhengig av formen på $\theta(\Psi)$ -kurven (vannretensjonskurven).

Ofte forenkles formelen ved å anta at $m=1-1/n$. Etersom θ_s er forholdsvis enkel å måle gir det 3 ukjente parametere; θ_r , α og n . Disse estimeres ofte fra forsøksdata (Markus Tuller, 2003). Etersom likningen inneholder så mange parametere som må fastsettes, er det krevende å benytte likningene slik at en får gode resultater. Derfor benyttes ikke formelen ytterligere i denne oppgaven.

Darcy's lov

I 1856 beskrev Darcy for første gang strømning gjennom porøse medier. Formelen kan derfor benyttes for både infiltrasjon og for å beskrive perkolasjon. Forutsatt lineær strømning vil strømmingen også i mettet sone følge Darcy's lov. Darcy fant ut at vannstrømmen var proporsjonal med vannets trykkehøyde og omvendt proporsjonal med lengden av strømningsveien. Strømmingen er også proporsjonal med arealet av overflaten vannet strømmer gjennom. Darcy fastslo også at vannmengden som strømmer gjennom mediet er proporsjonal med en konstant K som er avhengig av mediets egenskaper (Fetter, 2001). Darcys eksperimenter er grunnlaget for Darcys lov og beskriver hvordan vann strømmer gjennom det porøse mediet.

Darcys lov:

$$Q = -K * A * \frac{\Delta h}{\Delta l}$$

Hvor K er hydraulisk konduktivitet [m/s], A er arealet av overflaten vannet strømmer gjennom [m²], Δh er vannets trykkehøyde [m] og Δl er lengden av strømningsveien [m].

På grunn av tilgjengelige målinger og resultater fra forsøk benyttes en forenklet versjon av Darcy's setning i beregningene i oppgaven. Denne forenklingen tar ikke hensyn til trykkehøyden eller lengden av strømningsveien, ettersom ingen av delene vil være kjent ved gjennomføringen av forsøket.

Forenklet form av Darcy's lov:

$$Q = K_{sat} * A$$

Hvor Q er infiltrasjonsraten [m³/s], K_{sat} er den mettede hydrauliske ledningsevnen [m/t] og A er det effektive infiltrasjonsarealet [m²].

4.4 Hydraulisk konduktivitet

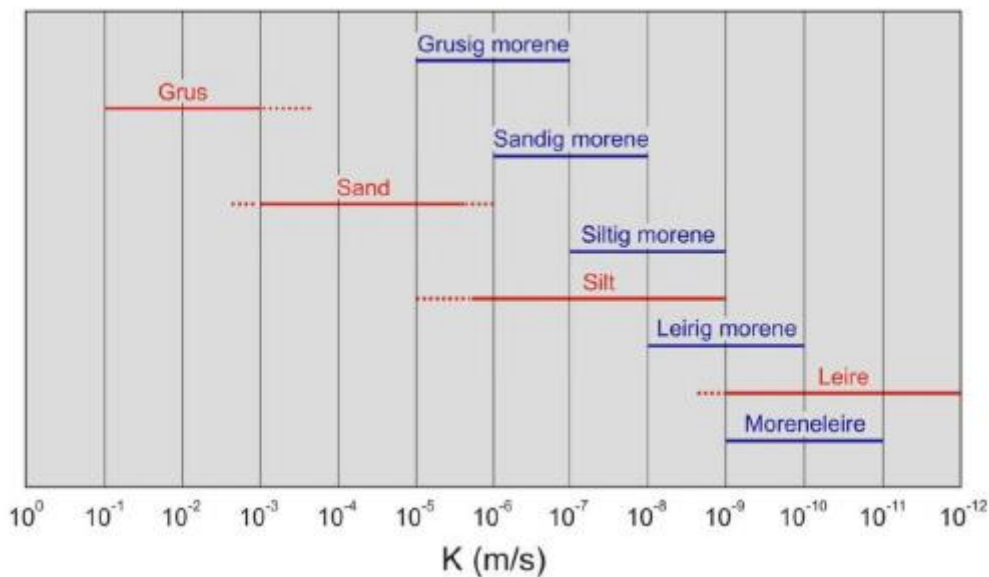
I 1956 pekte Hubbert på at konstanten K , måtte være en funksjon av både det porøse mediets egenskaper og egenskapene til væsken som strømmer gjennom det (Fetter, 2001). K benevnes i dag som hydraulisk ledningsevne eller konduktivitetskonstant, og er en funksjon av væskens og mediets strømningsegenskaper (Brattli, 2009).

Den hydrauliske konduktiviteten K:

$$K = \frac{k * \rho * g}{\eta}$$

Hvor k er mediet permeabilitet [m^2], ρ er væskens spesifikke egenvekt [kg/m^3], g er tyngdens akselerasjon [m/s^2] og η er væskens dynamiske viskositet [Ns/m^2].

Jordens hydrauliske konduktivitet er helt avgjørende for infiltrasjonsraten. Den hydrauliske konduktiviteten kan antas på bakgrunn av jordens klassifisering. Figur 12 viser typiske verdier for antakelser ved en slik klassifisering.



Figur 12 Hydraulisk konduktivitet. Modifisert av (Brattli, 2009), etter (L. Carlsson, 1984).

Men den hydrauliske kapasiteten påvirkes av forskjellige faktorer. Urbane områder er ofte tungt belastet, for eksempel med trafikk, utskiftning av masser og byggevirksomhet. Dette medfører at jorden komprimeres og porøsiteten samt infiltrasjonskapasiteten til jordsmonnet reduseres (Jin-Ling Yang, 2010). Studien utført av (Jin-Ling Yang, 2010) måler imidlertid infiltrasjon fra overflaten av jorden, så hvilken påvirkning denne komprimeringen har nedover i dypet er ukjent. Til sammenligning avtar trafikklast med dybden, og for rør som ligger under 2 meters dybde er ikke trafikklasten betydelig, derimot er jordtrykket økende med dybden (Sægrov, 2015). Det er usikkert hvor langt ned en eventuell komprimering vil påvirke de stedlige massene, men det kan med sikkerhet sies at det vil ha betydelig påvirkning på de øvre sjiktene.

Den hydrauliske konduktiviteten påvirkes også av klimatologiske forhold. For eksempel, ved lave temperaturer kan jordens hydrauliske kapasitet reduseres med opptil 50% sammenliknet med rom-temperatur. Videre kan is og snø redusere infiltrasjonsevnen til praktisk talt 0 (Kim H. Paus, 2016). Dette må i enkelte tilfeller hensynstas ved dimensjonering av overflatebaserte tiltak, men er ikke relevant for infiltrasjonssandfang da infiltrasjonsarealene ligger frostfritt.

Klassifiseringstabellen for hydraulisk ledningsevne basert på jordartsklassifisering har store intervall for verdiene til jordartene. Silt har ifølge tabellen i figur 12 en variasjon med en faktor 40. Dette tyder på at en slik klassifisering kan inneha store usikkerheter og vil dermed gi store usikkerheter i prosjekteringen. Tabellen tar heller ikke høyde for jordens komprimering eller påvirkningen av eventuelle vekst- og vegetasjonslag i overflaten av jorden. På grunn av den store usikkerheten en slik klassifisering innehar bør den stedlige infiltrasjonsraten, i form av den hydrauliske kapasiteten måles.

4.5 Måling av infiltrasjon ved MPD

I denne oppgaven er det gjort feltmålinger av infiltrasjon ved bruk av Modified Philip Dunne (MPD) infiltrometer. Dette er et infiltrometer som er billig å anskaffe, lett og bruke og det kreves lite vann for å utføre feltforsøkene. Beregningen av den hydrauliske konduktiviteten fra forsøkene gjøres av medfølgende dataprogram, og beregningene baseres på Green Ampt. Forsøksmetoden overestimerer typisk infiltrasjonsraten ved høy porøsitet, samt underestimerer den ved lav porøsitet. Likevel ansees testen som god, da de stedlige forskjellene uansett vil være store (F. Ahmend, 2014).

Begreper

- Videre i oppgaven benyttes begrepet infiltrasjon, for å samsvare med aktuelle produktets navn som er infiltrasjonskum.
- Videre i oppgaven benyttes K_{sat} , mettet hydraulisk konduktivitet og hydraulisk konduktivitet som begreper om hverandre.
- Når det refereres til K , med ulike indekser, er det alltid den mettede hydrauliske ledningsevnen det refereres, da denne er dimensjonerende. Dette fordi den minimale infiltrasjonsraten for jorden finnes ved beregninger basert på den mettede K -verdien.

5 BESKRIVELSE AV FORSØKSFELT

I dette kapittelet gis en detaljert beskrivelse av forsøksfeltene og de aktuelle infiltrasjonssandfangene.

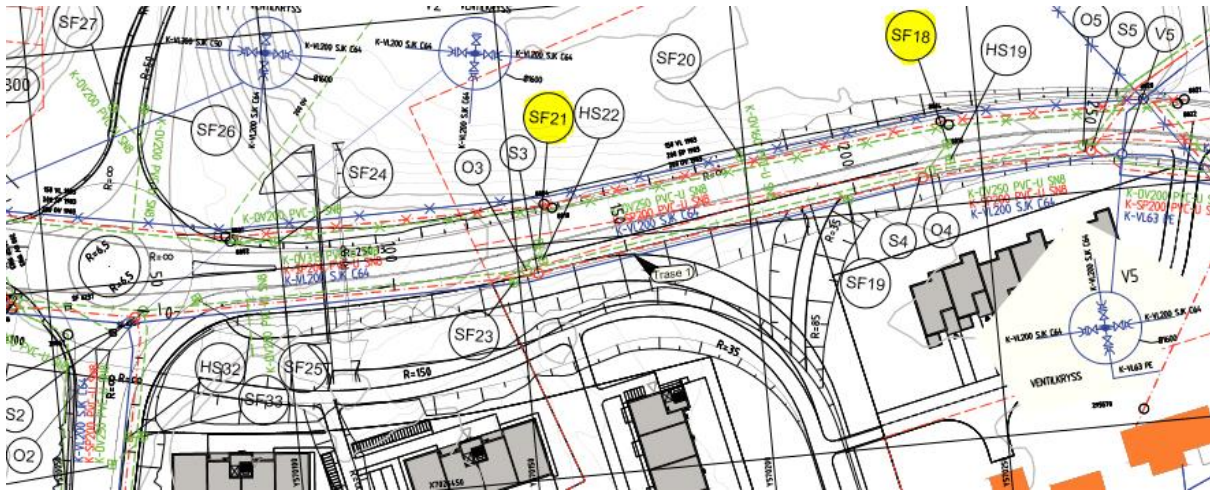
5.1 Trondheim, Tiller

Forsøkene er utført i perioden 20.03.2017 - 11.05.2017. Det er totalt utført 3 forsøk på 2 forskjellige kummer. De aktuelle infiltrasjonssandfangene hvor forsøkene utføres er på Tiller i Trondheim, og ble anlagt sommeren 2015. Byggetegning for de aktuelle kummene finnes i vedlegg 1. Begge kummene skal være av typen IFS kum. Kummene ligger i veibanen. Området ligger helt i utkanten av bygrensen til Trondheim, og bebyggelsen i området er boliger av nyere dato. De aktuelle kummene ble anlagt i 2015 for å håndtere økt avrenning på grunn av ny boligbebyggelse i området.

Kartutsnittet i figur 13 viser infiltrasjonssandfangenes beliggenhet. Figur 14 er en plantegning, som viser de aktuelle infiltrasjonssandfangene, markert med gult; SF18 og SF21.

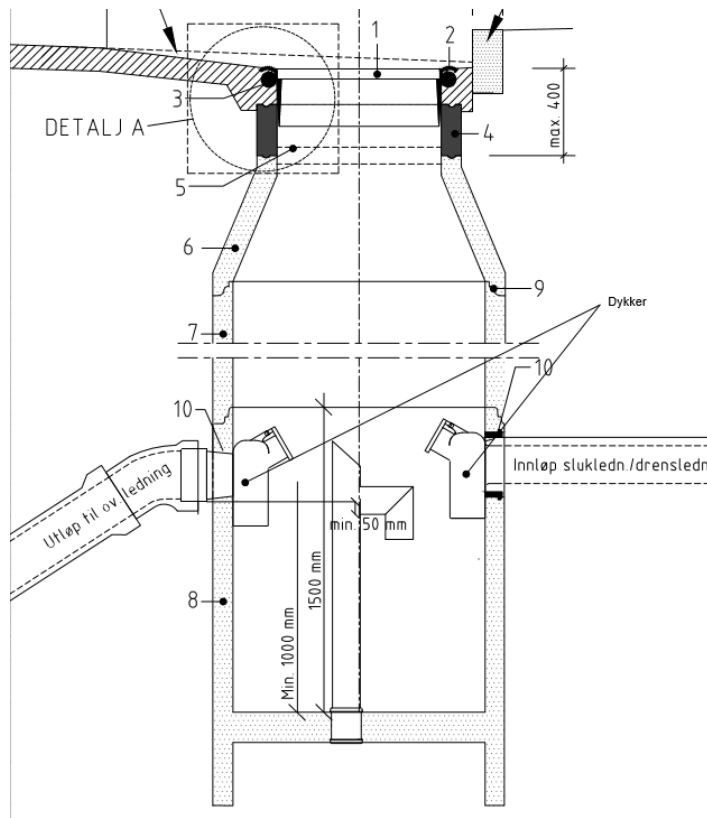


Figur 13 Flyfoto som viser området og vegen hvor kummene er anlagt (Finn.no, 2017). De røde kryssene illustrerer kummenes plassering.



Figur 14 Plantegning som viser de aktuelle kummene det er utført forsøk i (Norconsult, 2014).

5.1.1 Beskrivelse av infiltrasjonssandfang



Figur 15 Utklipp av byggetegning for kummene som er anlagt på Tiller i Trondheim (Norconsult, 2014).

De to kummene som er testet på Tiller i Trondheim er av typen som er illustrert i figur 15. Hele byggetegningen finnes i vedlegg 1. Byggetegningene er av typen som bygget, og skal illustrere det faktiske anlegget. Byggetegningene mangler spesifisering av størrelsen på pukkvolumet rundt sandfangskummen. Byggetegningene spesifiserer kun minste høyde på pukktoppen under kummen, samt minste bredde på påfyllingen rundt kummen. Dette gir usikkerheter knyttet til det totale fordrøyningsvolumet i pukkmagasinet, samt arealet mellom pukkmagasinet og de stedlige massene. Det er på dette arealet infiltrasjon vil skje.

I forbindelse med forsøkene ble det avdekket flere feil med kummene sammenlignet med byggetegningene. Infiltrasjonsrøret står ikke så høyt som det er angitt i byggetegningene. I den ene kummen stod infiltrasjonsrøret høyere enn overløpet, slik at alt vann gikk i overløp og ingenting til infiltrasjon. Denne feilen ble rettet på ved at infiltrasjonsrøret ble kappet i bunnen. At infiltrasjonsrøret kappes, samt at det står lavere enn byggetegningene angir, fører til at kummens sandfangsvolum blir mindre enn beregnet. Kummens funksjon beskrives i tabell 1.

Tabell 1 Tabellen beskriver kummens elementer og deres funksjon.

Element	Funksjon
<i>Sandfang</i>	Sandfanget skiller ut sedimenter fra overvannet
<i>Dykker på infiltrasjonsrør</i>	Hindrer flytepartikler å nå pukkvolumet og infiltrasjonsflaten
<i>Pukkmagasin</i>	Pukkmagasinet's porøsitetvolum kan benyttes til fordrøyning
<i>Areal mellom stedlige masser og pukkmagasin</i>	På arealet mellom pukkvolumet og de stedlige massene vil infiltrasjon skje
<i>Hulrom under kumbunn</i>	Fordrøyningskammer. Fordrøyer vannmengder samt fordeler vannet over et større areal.
<i>Overløp</i>	Når kummens fordrøyningskapasitet er nådd, samt infiltrasjonsevnen overstiges vil den overflødig vannmengden gå i overløp til det kommunale ledningsnett.

5.1.2 Volum- og areal

Ettersom SF 21 har den beste kvaliteten på forsøket er volum- og arealberegningene kun for dette infiltrasjonssandfanget (og ikke SF18) tatt med i oppgaven.

Justerte høyder

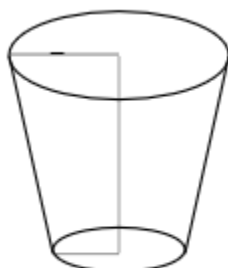
I følge som-bygget-tegningene skal sandfangene ha like spesifikasjoner. Måling av kummene avdekket imidlertid ulikhet. Infiltrasjonsrørene og overløpene i kummene har ikke lik høydeangivelse. Høyden på infiltrasjonsrøret stemmer heller ikke overens med byggetegningene. I den ene kummen stod infiltrasjonsrøret lavere enn overløpet, slik at alt vannet gikk rett i overløp. På grunn av denne byggefeilen infiltrerte ikke kummen noe vann. Infiltrasjonsrøret er nå justert til å stå lavere og målene svarer til justeringen.

Areal- og volumberegninger

Byggetegningene spesifiserer ikke størrelsen av pukkvolumet rundt kummen. Dette gir stor usikkerhet med tanke på fordrøyningsareal og infiltrasjonsflate. For beregninger av volumer og arealer i denne oppgaven er det gjort ulike antakelser og beregnet forskjellige alternativer for både volum og areal. De følgende beregningene omfatter SF21, da forsøkene utført på denne kummen har best kvalitet. Beregningene er utført på bakgrunn av målte høyder og med følgende antakelser:

- Høyden på pukkvolumet samsvarer med vannstanden som ble målt i IFS-kummen under forsøket. Dette for å kunne benytte verdiene fra forsøket til sammenlikning og analyse av kapasitet.
- Porøsiteten i pukkvolumet antas å være 0,35
- Det antas at grøften har form tilnærmet som en kjeglestump, se figur 17. Volum og areal beregnes etter 3 forskjellige skråningshelninger:
 - 1:0,5, beregningene gjøres ved å betrakte grøften som en kjeglestump
 - 1:1,5, beregningene gjøres ved å betrakte grøften som en kjeglestump
 - Rette vegger; beregningene gjøres ved sylindrebetraktning
- Byggetegningene spesifiserer at kummen skal stå på en minst 500 mm tykk pute av pukk. Det spesifiseres også at kummen skal omfylles med pukk minst 300 mm fra kumveggen. På bakgrunn av denne spesifiseringen er det gjort to mulige antakelser.

- Det antas at det er 300 mm horisontalt fra kumbunnen og til sideskråningen på toppen av pukktoppen.
- Det antas at radius i bunn av pukktoppen har radius: kumbunn + 300mm med puk.



Figur 16 Kjeglestump; illustrerer betraktningen av pukkvolumet rundt kummen.

Beregningene gir 5 forskjellige alternativer for infiltrasjonsareal og fordrøyningsvolum. Ytterligere beskrivelse av alternativene finnes i tabell 2. Maksimums- og minimumsverdier for kummens fordrøyningsvolum og infiltrasjonsareal finnes i tabell 3.

Tabell 2 Beskriver de alternative utformingene av kummens omkringliggende pukkvolum.

Alternativ	Skråningshelning	Beskrivelse
1	1:0,5	Pukkputens bunnradius: radius kum + 300 mm
2	1:1,5	Pukkputens bunnradius: radius kum + 300 mm
3	Sylinderbetraktning	Begge alternativer gir samme resultat
4	1:0,5	300 mm fra kumbunn til sideskråning
5	1:1,5	300 mm fra kumbunn til sideskråning

Resultatene av beregningene for de forskjellige alternativene finnes i vedlegg 3. Beregningene gir betydelig variasjon i infiltrasjonsareal og fordrøyningsvolum, se tabell 3.

Tabell 3 Viser min- og maxverdier for kummens fordrøyningsvolum og infiltrasjonsareal.

	Min	Max
Fordrøyningsvolum [m ³]	1,0	3,2
Infiltrasjonsareal [m ²]	11,0	30,0

Valg av alternative grøfteskrånninger gjøres på bakgrunn av normal anleggsutførelse. Skråningsvinkel 1:1,5 er stabil skråningshelning for de stedlige massene, sand. Typisk graves det så bratt som skråningen står, og i urbane og komprimerte jordmasser er ofte dette rimelig bratt, derfor velges skråningsvinkel 1:1,05. For å ta høyde for helt rette sideskrånninger beregnes grøften med en sylindrebetraktning. En skråningshelning mellom 1:1,5 og 1:1,05, nærmere 1:05, ansees som mest sannsynlig. Det er ikke kjent hvordan målingen av avstanden 300 mm fra kum er utført, derfor beregnes volum og areal for to alternative utførelser.

Porøsitet mellom 0,30-0,40 er typiske verdier som benyttes for porøsitet for pukkgrofter i bransjen. For beregninger i denne oppgaven benyttes 0,35.

5.1.3 Infiltrasjonskapasitet

Infiltrasjonskapasiteten i området er vurder ved å vurdere den hydrauliske ledningsevnen til de stedlige massene. Den hydrauliske ledningsevnen er vurdert på bakgrunn av to forskjellige kilder.

NGUs løsmassekart

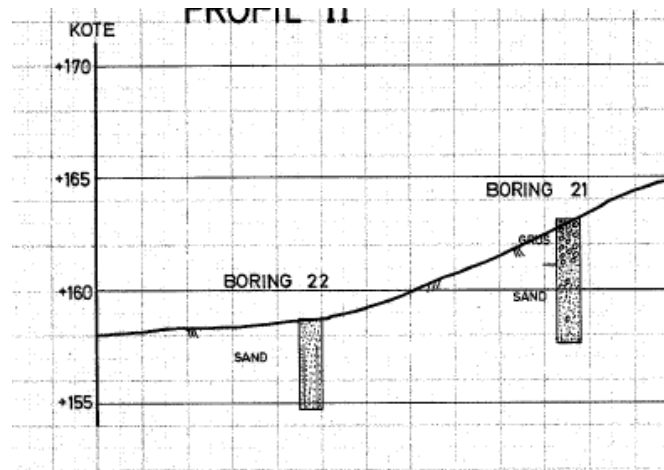
NGUs løsmassekart er en karttjeneste som indikerer hvilke løsmasser som finnes i grunnen. Fra dette kartet kan en beskrive løsmassen og dermed anta en K-verdi som samsvarer med de stedlige grunnforholdene. Løsmassekartet er utarbeidet av NGU med grunnlag i grunnboringer som finnes i områdene. Opplysningen i kartet kan variere og kvaliteten på opplysningen varierer mellom områder. I følge kartet er grensene i det aktuelle kartet oppdatert i 2015 og sjekket i felt (NGU, 2017). På bakgrunn av dette ansees kartdataen å være av god kvalitet. Kartutsnitt fra løsmassekartet for aktuelt område finnes i figur 17. I følge kartet består området av breelvavsetning. Breelvavsetning er en avsetning som består av sand og grus (Huseby, 2002).



Figur 17 Kartutsnitt fra NVEs løsmassekart over det aktuelle området hvor kummene er anlagt (NGU, 2017).

Grunnboringer

Det finnes grunnboringer i det aktuelle området. Boringene er utført i 1977 og i 1978 av Trondheim kommunes geotekniske seksjon. Figur 18 viser er utklipp av resultatene fra boreprøvene. Det er til sammen gjort 25 boreprøver i området og 172 prøver er hentet ut og klassifisert på laboratorium. Rapportene fra grunnboringene viser at området for det meste består av sand- og grusmasser. Noen grunnboringer viser korte partier med siltig leire og silt. For 13 av prøvene er det gjennomført sikteprøve. Samtlige sikteprøver karakteriserer jorden som sand eller som en sammensetning av sand og grus, enten som sandig grus eller som gruset sand (Geoteknisk Seksjon, 1977).



Figur 18 Viser et utsnitt fra resultat av boreprøvene for de borehullene som er nærmest de aktuelle kummene det er gjennomført forsøk i (Geoteknisk Seksjon, 1977).

5.1.4 Hydraulisk konduktivitet

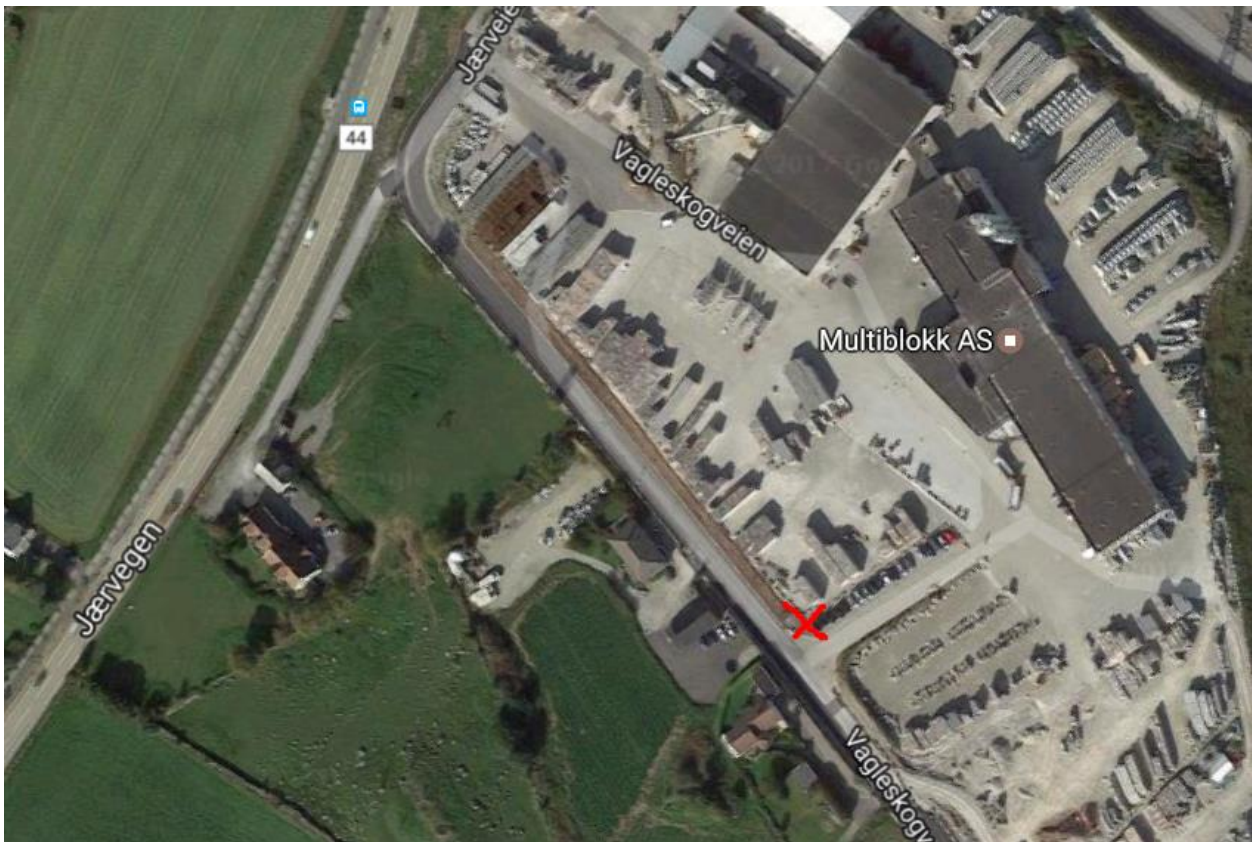
Hydraulisk konduktivitet basert på løsmassekartet og grunnboringene velges på bakgrunn av klassifiseringstabell etter L. Carlsson, senere modifisert av Brattli. Tabellen finnes i figur 12.

På bakgrunn av løsmassekartets identifisering velges K_{sat} -verdi for breelavsetning lik sand. K_{sat} -verdi for sand hentes fra figur 14. Verdi midt mellom 10^{-4} m/s og 10^{-3} m/s velges. Dette gir $5,5 \cdot 10^{-4}$ m/s = en K_{sat} på 198 cm/time

Fra de geotekniske undersøkelser ansees en K-verdi i det høyeste sjiktet av sand som sannsynlig. K-verdi velges på bakgrunn av figur 14. Velger verdi midt mellom 10^{-4} m/s og 10^{-3} m/s. Dette gir en K_{sat} på 198 cm/time, $5,5 \cdot 10^{-4}$ m/s.

5.2 Sandnes, Multiblokk

Forsøket ble utført 12. mai 2017. Infiltrasjonskummen som var objektet for forsøket er anlagt 2014 og er en del av testfeltet til Multiblokk (samarbeidsbedrift til StormAqua) i Sandnes. Kummen ligger i Vagleskogveien og er markert med SF6 på byggetegningene. Kummens byggetegning finnes i vedlegg 2. Kartutsnittet i figur 19 viser kummens beliggenhet. Figur 20 er en plantegning som viser den aktuelle kummen, merket med gult SF6.

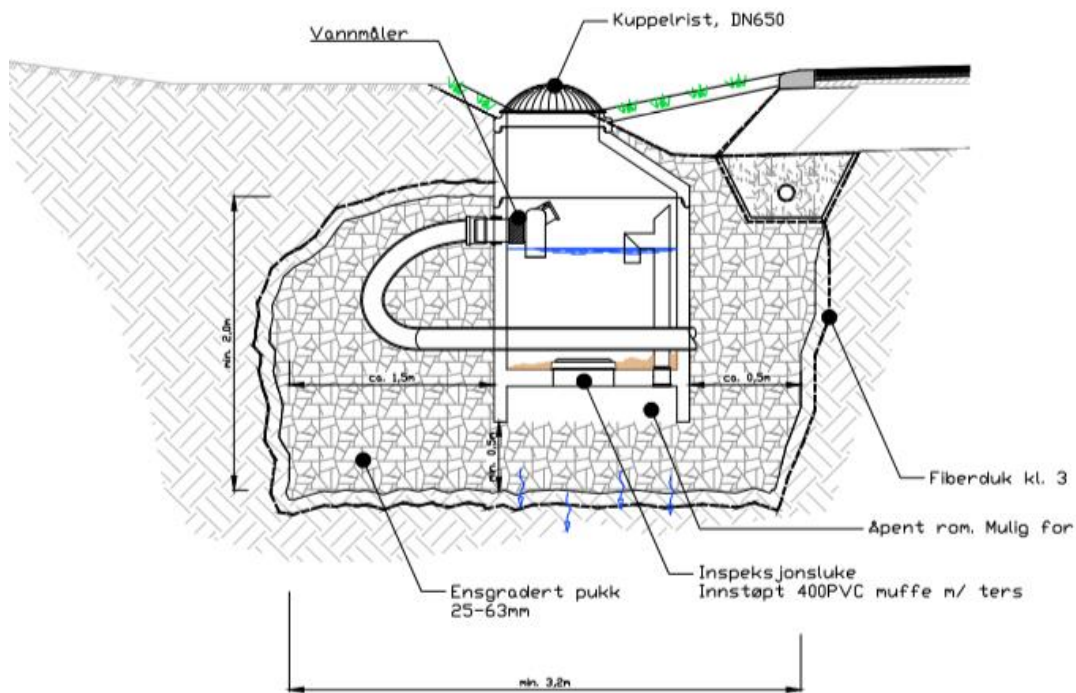


Figur 19 Kartutsnitt over området hvor kummen er anlagt, rødt kryss illustrerer kummens plassering (Finn.no, 2017).



Figur 20 Plantegning hvor den aktuelle kummen er markert med gult (Cowi, 2014).

5.2.1 Beskrivelse av infiltrasjonssandfang



Figur 21 Figuren er et utklipp fra byggetegningen til infiltrasjonssandfangen i Sandnes (Cowi, 2014).

Infiltrasjonssandfanget som er testet i på testfeltet til Storm Aqua (Multiblokk) i Sandnes er utformet slik figur 21 viser. Byggetegning finnes også i vedlegg 2. Byggetegningene

inneholder spesifisering av pukkmagasinet volum, men mangler spesifisering av overflatearealet. Høyden på infiltrasjonsrøret, overløpet og høyden til perforert infiltrasjonsrør er ikke spesifisert i byggetegningene. Disse høydene er målt inn i ettertid. Kummens elementer og funksjon beskrives i tabell 4.

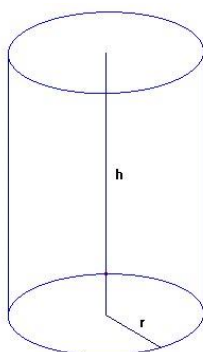
Tabell 4 Tabellen beskriver kummens elementer og deres funksjon.

Element	Funksjon
<i>Sandfang</i>	Sandfanget skiller ut sedimenter fra overvannet
<i>Dykker på infiltrasjonsrør</i>	Hindrer flytepartikler å nå pukkvolumet og infiltrasjonsflaten
<i>Pukkmagasin</i>	Pukkmagasinet porøsitetvolum kan benyttes til fordrøyning
<i>Areal mellom stedlige masser og pukkmagasin</i>	På arealet mellom pukkvolumet og de stedlige massene vil infiltrasjon skje
<i>Hulrom under kumbunn</i>	Fordrøyningskammer. Fordrøyer vannmengder samt fordeler vannet over et større areal.
<i>Overløp</i>	Når kummens fordrøyningskapasitet er nådd, samt infiltrasjonsevnen overstiges vil den overflødig vannmengden gå i overløp til det kommunale ledningsnett.
<i>Overløp til perforert rør i pukkmagasin</i>	Dette overløpet fører vann inn i pukkmagasinet når vannstanden står høyere enn dykkeren og fungerer når dykkerens kapasitet eventuelt overstiges.
<i>Inspeksjonsluke i bunn</i>	Inspeksjonsluken er for forskning, og gjør at en kan inspisere pukkvolumet over tid.

Areal- og volumberegninger

Byggetegningene for infiltrasjonssandfanget i Sandnes har noe spesifisering av pukkvolumets geometri. I byggetegningen er det spesifisert at pukkvolumet skal være 10m^3 , men en kontrollberegning av dette tyder på at ikke hele volumet aktiviseres under forsøket. For å beregne fordrøyningsvolumet og infiltrasjonsarealet som er aktivert under forsøket er det gjort følgende antakelser:

- Beregningene baserer seg på målsettingen på byggetegningen samt den målte vannstanden i kummen under forsøket.
- Skråningshelningen er antatt å være tilnærmet rett og volumet beregnes med sylinderbetraktning, illustrert i figur 22.
- Porøsiteten i pukkvolumet beregnes til å være 0,35 i samsvar med beregningene for kummene på Tiller.



Figur 22 Sylinder. Illustrerer betraktningen av pukkvolumet rundt kummen.

Resultatene av beregnet infiltrasjonsareal og fordrøyningsvolum følger i tabell 5 og 6:

Infiltrasjonsareal

Tabell 5 Tabellen viser beregnet infiltrasjonsareal for den aktuelle kummen i Sandnes.

Infiltrasjonsareal			
	9.08	m^2	Areal bunn
+	15.36	m^2	Areal sideflater
=	24.44	m^2	Totalt infiltrasjonsareal

Fordrøyningsvolum

Tabell 6 Tabellen viser beregnes fordrøyningsvolum for den aktuelle kummen i Sandnes.

Fordrøyningsvolum			
	13.056	m ³	Volum pukk
-	1.444	m ³	Volum kum
=	11.612	m ³	
x 0.35 =	4.064	m ³	Effektivt volum pukk
+	0.283	m ³	Volum hulrom
=	4.347	m³	Totalt fordrøyningsvolum

I likhet med kummene i Trondheim er kummens maksimale kapasitet noe større, da vannstanden kan stå høyere i kummen og dermed aktivere mer fordrøyningsvolum og infiltrasjonsflate. Heller ikke i byggetegningene for infiltrasjonssandfanget i Sandnes er det spesifisert noen skråningshelning på utgravingen. Bilder fra anleggsperioden viser at skråningsvinkelen er bratt, og volumet beregnes derfor ved bruk av sylinderbetraktning.

I likhet med byggetegningene for infiltrasjonskummene på Tiller i Trondheim er byggetegningen for den aktuelle kummen i Sandnes mangelfull. Byggetegningene burde spesifisert skråningshelningen på utgravingen og det kunne med fordel vært høydeangivelser på infiltrasjonsdykkeren, samt overløpet. Dette er beskrivelser som er avgjørende for kummens funksjon og kapasitet

5.2.2 Hydraulisk konduktivitet

Verdier for den hydrauliske konduktiviteten i de stedlige massene rundt infiltrasjonskummen i Sandnes er hentet fra tidligere utførte målinger på området utført med infiltrrometer. Rapporten finnes i vedlegg 4. Rapporten fra forsøket resulterer i 4 forskjellige verdier for K-sat. Tabell 7 viser verdier fra de fire målingene.

Tabell 7 Resultater fra infiltrometertester som er gjennomført på feltet (Cowi, 2014).

Målt hydraulisk konduktivitet	
[m/døgn]	[m/s]
27,39	0,000317
0,89	0,000010
0,48	0,0000056
0,49	0,0000057

Disse verdiene benyttes til å regne ut alternative K-verdier som er reell for infiltrasjonskummen. Disse alternativene gir følgende resultater, vist i tabell 8.

Tabell 8 Viser resultater for alternative beregnede K-verdier.

K _{sat} -verdi			
Prøvenummer	m/døgn	m/sek	cm/time
1	27.39	0.00032	114.13
2	0.89	0.00001	3.71
Gj.snitt 1 og 2	14.14	0.00016	58.92
Gj.snitt alle 4	7.3125	0.00008	30.46

På grunn av stor ulikhet i verdiene kan det se ut som om måling 1 er en feilmåling og dermed burde utelukkes fra videre beregninger. Det er vanskelig å si noe om de utførte målingene ettersom de er utført av andre. Per Møller-Pedersen, fra StomAqua, var tilstede ved både infiltrasjonstester og bygging av infiltrasjonskummen. Han uttaler at grunnforholdene ved prøve nummer 1 er de som er mest lik grunnforholdene hvor infiltrasjonskummen ble bygget (Møller-Pedersen, 2017). Ettersom det ikke er noen åpenbar grunn til å utelukke noen verdi benyttes alle fire målte verdiene for K_{sat} i beregning av alternativer, se tabell 7. De alternative verdiene gir god spredning i alternative infiltrasjonsverdier.

6 METODE

Dette kapitlet beskriver metodene som er benyttet ved utføring av forsøkene. Kapitlet beskriver også hvordan resultatene fra forsøkene er bearbeidet. Ettersom det er noen forskjeller mellom forsøkene som er utført i henholdsvis Trondheim og Sandnes, er forsøkene beskrevet hver for seg. Ytterligere beregninger er lik for begge forsøksmetodene.

6.1 Trondheim, Tiller

Forsøkene er utført 20. mai, 6. april og 11. mai, alle 2017. Det er totalt utført 3 forsøk på 2 forskjellige kummer. Målet med forsøket har vært å måle kapasiteten til et infiltrasjonssandfang. Spesielt har målsetningen vært å komme fram til parametere som er avgjørende for å bestemme kapasiteten til et infiltrasjonssandfang. De mest vesentlige parameterne som er vurdert er listet opp i tabell 9.

Tabell 9 Tabellen viser parametere som er viktige for å bestemme kummens kapasitet.

Parameter	Formål
Kummens volum	Fordrøyning
Volumet til omkringliggende pukkmasser	Fordrøyning
Hydraulisk konduktivitet til stedlige masser	Til beregning av infiltrasjonsrate
Areal for infiltrasjonsflate	Til beregning av infiltrasjonsrate

6.1.1 Forsøk med vann i infiltrasjonskum

For å avdekke kummens egenskaper fylles kummen med vann. Vannet tilføres fra Trondheim bydrifts spylebil, og tilført vannvolum måles med en mekanisk vannmåler som monteres på spyleslangen til spylebilen. Når både pukklageret rundt kummen og kummen er fylt med vann, antas det at vannmengden ut av kummen tilsvarer det som forsvinner ut av kummen via infiltrasjon.

Utstyr:

- Spylebil med tilgjengelig vannvolum 14 m³.
- Spyleslange tilhørende spylebil
- Slamtømmeutstyr tilhørende spylebil
- Vannmåler for å montere på spylebilens spyleslange.
- Meterstav
- Kamera for dokumentasjon

Figur 23 viser målestav og vannmåleren under forsøket.



Figur 23 Viser påfylling av vann i infiltrasjonskummen under forsøk.

I det videre er det gitt en nummerert gjennomgang av metoden:

1. Kummen tømmes for slam ved bruk av spylebilens slamsuging.
2. Høyden på infiltrasjonsrøret måles.
3. Kummen fylles med vann til en høyde 0,16 m over bunn infiltrasjonsrør. Tiden det tar å fylle opp måles.
4. Påfylt vannmengde leses av vannmåleren.
5. Tiden det tar for vannet å nå nivået før påfyllingen (bunn infiltrasjonsrør) måles og noteres.

6. Når vannstanden i kummen når bunn av infiltrasjonsrøret, fylles kummen med vann igjen til samme nivå som ved sist påfylling (16 cm over bunn infiltrasjonsrør).
7. Påfylt vannmengde leses av vannmåleren.
8. Steg 5 og 6 gjentas til det observeres at nedsynkingen tar like lang tid for hver påfylling.

Fra forsøket får én for hver påfylling resultater som forteller:

- Tiden det tar å fylle kummen til en gitt høyde
- Volumet som fylles på ved hver påfylling
- Tiden det tar for vannstanden å synke til startnivået før vannfyllingen

6.1.2 Beregning av kummens infiltrasjonskapasitet

Innsamlede data fra forsøket, samt volum og arealberegninger, benyttes til å beregne kummens infiltrasjonskapasitet. Videre følger en nummerert gjennomgang av beregningene som er utført:

1. Totalt påfylt vannmengde finnes av differansen av vannmålerens målestend før og etter utført forsøk.
2. Total påfylt vannmengde sammenliknes med beregnet fordrøyningvolum. For å forsikre at hele fordrøyingsvolumet har vært aktivert under forsøket, må påfylt volum være større enn beregnet fordrøyingsvolum. Denne påstanden må stemme før en kan anta at vannmengden ut av kummen tilsvarer infiltrasjonen.
3. Eppersom vannstandsøkningen i kummen under påfyllingen er kjent og kummens geometriske form er kjent beregnes vannmengden som fylles i kummen.
4. Volumet som er fylt i kummen deles på tiden det tar for vannmengden å synke ut av kummen igjen. Dette gir infiltrasjonsraten [l/s].
5. Gjennomsnittet av grafens 3 siste punkter beregnes, og antas å være kummen infiltrasjonskapasitet ved mettede forhold.

6.1.3 Forsøk med infiltrometer

For å sannsynliggjøre den beregnede infiltrasjonsraten fra infiltrasjonskummene gjennomføres forsøk med infiltrometer i umiddelbar nærhet til de aktuelle kummene. MPD-infiltrometer benyttes til disse forsøkene. MPD-infiltrometer (Modified Philip-Dunne) er en enkel måte å måle infiltrasjonsevne og spesifikk mettet hydraulisk konduktivitet

(K_{sat}). Forsøk med MPD-infiltrrometer ble valg ettersom forsøkene er forholdsvis enkle å gjennomføre, da de verken krever mye tid, mye vann eller dyrt utstyr.

Infiltrrometerene er sylinderformede glasskolber, med metallring nederst, for å stå bedre fast i jorden. Tversnittarealet er kjent og infiltrrometeret fylles til en gitt vannhøyde dette gir et kjent volum og avtakende vannstand i infiltrrometeret kan omregnes til infiltrasjonsrate over tid. En gummitråd er festet på lokket til infiltrrometeret, lokket har elektronikk til å måle oppdriften av gummitråden, og på den måten beregnes vannstanden i glasskolben. Målinger for vannstanden over tid gir infiltrasjonsraten.

Utstyr:

- MPD-infiltrrometer med tilhørende nettbrett, se figur 24
- GPS
- Jordfuktmåler
- Spade
- Vann



Figur 24 Viser typen MPD-infiltrrometer med tilhørende nettbrett som er benyttet ved forsøket (Upstream Technologies, 2017).

Videre følger en nummerert beskrivelse av metoden:

1. Infiltrrometerene slås ned i jorden, så langt at den tynne metalldelen er dekket med jord. Figur 25 viser alle 3 infiltrrometer festet i jorden.
2. Jordas fuktighet like ved infiltrrometerene måles med en jordfuktmåler på stedet.

3. Nettbrettet tilhørende infiltrrometerene slås på og programmeres for forsøkene.
4. Infiltrrometerene fylles med vann og målingene startes.
5. Målingene leses av automatisk over en bestemt tidsperiode, eventuelt til infiltrrometeret er tomt for vann.
6. Målingen stoppes og infiltrrometerene tas ut av jorda.
7. Fuktigheten til den våte jorden måles med jordfuktmåleren.
8. K_{sat} beregnes av programvaren på nettbrettet.



Figur 25 Viser alle infiltrrometerene under forsøket, før de fylles med vann.

Fra forsøket får en resultater som forteller:

- K_{sat} -verdi for hvert punkt

6.1.4 Analysering av forsøk

For å si noe om kvaliteten på målingene beregnes:

1. Standardavviket til de målte resultatene.
2. Variasjonskoeffisienten til de målte resultatene.

6.1.5 Bestemmelse av K_{sat} -verdi

1. De målte verdiene sammenstilles og på K_{sat} -verdien beregnes som median av de målte verdiene.
2. Målte verdier sammenlignes med K_{sat} -verdier fra NVEs løsmassekart og verdier som er basert på grunnboringene.
3. De mest konservative verdiene benyttes for videre beregning.

6.2 Sandnes, Multiblokk testfelt

Forsøket ble utført 12. mai 2017. For å avdekke kummens kapasitet fylles kummen med vann. Vannet tilføres fra en vannslange som finnes på testfeltet.

6.2.1 Forsøk med vann i infiltrasjonskum

Utstyr

- Stoppeklokke
- Notatblokk og penn
- Kamera for dokumentasjon
- Vannslange med en maks kapasitet på 3 l/s
- Vannmengdemåler montert på vannslange
- Programvare for styring av vannmengden inn i kum
- Trykksensor i bunn av kummen
- Programvare for avlesning av trykksensor og vannstandhøyde i kummen

Figur 26 og 27 viser den aktuelle kummens installasjoner. Installasjonene er nummerert og beskrivelse finnes i tabell 10.



Figur 26 Bilde er tatt fra Multiblokks testfelt i Sandnes under utføring av forsøket.



Figur 27 Infiltrasjonskummen det utføres forsøk på, kummen elementer er nummerert.

Tabell 10 Tabellen beskriver de ulike elementene i kummen, elementene er nummerert i hht. figur 26 og 27.

Nummerering	Beskrivelse
1	Datamaskin med programvare for å styre vanntilførsel, samt måle vannstands nivå i kummen ved trykksensor.
2	Vannslange til forsyning av kummen (maks kapasitet 3 l/s)
3	Infiltrasjonskummen (topp i gateplan)
4	Plassering av trykksensor på bunn av kummen. Trekkerør for sensorens ledninger.
5	Rør for infiltrasjon, utformet som en dykker.
6	Vannmåler, montert på overløp. Ikke i bruk under forsøket.
7	Plugget hull. Har ingen funksjon.

I det videre er det gitt en nummerert gjennomgang av metoden for utføringen av forsøket:

1. Vannmengden som står i kummen avleses.
2. Vannslangen føres inn i kummen.
3. Ventilen til vannslangen åpnes fra datamaskin ved bruk av programvare. Stoppeklokken startes samtidig som ventilen åpnes. Vannmengden ut av slangen og gjennom vannmåleren måles, og noteres.
4. Påfyllingsmengden reguleres slik at dykkeren tar inn vann og vannstanden er tilnærmet konstant.
5. Hver gang den påfylte vannmengden reguleres må tidspunkt samt samsvarende mengde fra vannmåleren noteres.
6. Vannstanden i kummen må overvåkes via programvare knyttet til trykksensoren.
7. Vannstanden i kummen skal ikke overstige frostoverløpet på infiltrasjonsdykkeren.
8. Når vannstanden i kummen plutselig stiger uten at tilført vannmengde er økt siste minuttet noteres tidspunktet og vannmengden som tilføres reduseres.
9. Vannmengden må nå finjusteres, for å finne en vannmengde som gjør at vannstanden i kummen er konstant.
10. Når vannstanden har vært konstant i 5 minutter med den samme tilførte vannmengden avsluttes påfyllingen.
11. Tiden det tar for vannet å synke, ned til under infiltrasjonsrøret igjen, logges i programvaren til trykksensoren.

Fra forsøket får én resultater som forteller:

- Hvor mye vann som er fylt i kummen frem til stabil infiltrasjonsrate nås
- Hvor lang tid det tar før stabil infiltrasjonsrate nås.
- Stabil infiltrasjonsrate
- Hvor lang tid det tar før vannet synker en gitt høyde i kummen.

6.3 Ytterligere beregninger

Disse ytterligere beregningene gjelder for forsøk 3 i på Tiller og forsøket i Sandnes.

6.3.1 Infiltrasjonsrate

Infiltrasjonsraten beregnes etter en forenklet form for Darcy's lov, utdypet i 3.3.1 formelverk for perkolasjon.

$$Q = K_{sat} * A$$

Hvor Q er infiltrasjonsraten [m^3/s], K_{sat} er den mettede hydrauliske ledningsevnen [m/t] og A er det effektive infiltrasjonsarealet [m^2].

6.3.2 Effektivt infiltrasjonsareal og aktuell K_{sat} -verdi

Bestemmelse av effektivt infiltrasjonsareal og aktuell K_{sat} -verdi er beregnet på samme måte for alle utførte forsøk, videre følger en nummerert gjennomgang av metoden.

1. Basert på tidligere arealberegninger beregnes totalt infiltrasjonsareal for alle alternativene for deltakende sidearealer. For forsøket i Trondheim utføres beregningen for 3 alternative arealberegninger.
2. Alternativene for effektivt infiltrasjonsareal multipliseres med alle alternativ for mulige K_{sat} -verdier.
3. For hver alternative K_{sat} -verdi plottes en graf som funksjon av effektivt infiltrasjonsareal.
4. Funksjonene for alle forskjellige K_{sat} -verdiene plottes i samme diagram. Y-aksen er infiltrasjonskapasitet [l/s], mens X-aksen er effektivt sideareal til infiltrasjon [%].
5. Kummens målte infiltrasjonskapasitet plottes inn i samme diagram.
6. Eventuelle skjæringspunkter mellom den målte verdien og grafene i diagrammet leses av. Skjæringspunkter vil indikere samsvar i verdier.
7. Skjæringspunktet mellom en bestemt verdi for K_{sat} -verdien og den målte kapasiteten viser hvor mye av sideskråningene i fordrøyningsvolumet som bidrar til infiltrasjon. Dersom det kun er en graf som skjærer den målte verdien vil det bekrefte hvilken K_{sat} -verdi som er mest korrekt.

6.3.3 Kapasitetsberegninger med regnvelopmetoden

For å sjekke kummens kapasitet i forhold til dimensjonerende nedbørshendelse benyttes regnvelopmetoden. I dette tilfellet benyttes regnvelopmetoden til å beregne kapasiteten basert på resultatene fra forsøkene.

- Dimensjonerende nedbørshendelse: settes til å være 20 år.
- Klimafaktor settes til 1,4.
- Areal: tilrenningsarealet antas å være 500 m² og ha en avrenningskoeffisient på 0,9.

Videre følger en nummerert beskrivelse av beregningen:

1. Dimensjonerende nedbørshendelse har en returperiode på 20 år.
2. Intensiteter for nedbørshendelse hentes fra IVF-kurve fra Roland, Sandnes. Kurven finnes i vedlegg 7.
3. Det antas at kummen skal håndtere en avrenning fra et areal på 500 m², med en avrenningskoeffisient på 0,9. Dette gir et redusert areal på 450 m².
4. Kummens utløpskapasitet settes lik den målte infiltrasjonsraten.
5. Det totale volumet for hver varighet i den aktuelle hendelsen beregnes med en klimafaktor på 1,4.
6. Det totale volumet som kummen kan håndtere for hver varighet beregnes.
7. Volumet kummen kan håndtere sammenliknes med volumet for nedbørshendelsen. Dette gjøres for hver varighet.
8. Den største forskjellen i kapasitet og nedbørsvolum er dimensjonerende for størrelsen på fordrøyningsvolumet.
9. Det kontrolleres så om kummen har tilstrekkelig fordrøyningsvolum til å håndtere den dimensjonerende hendelsen.

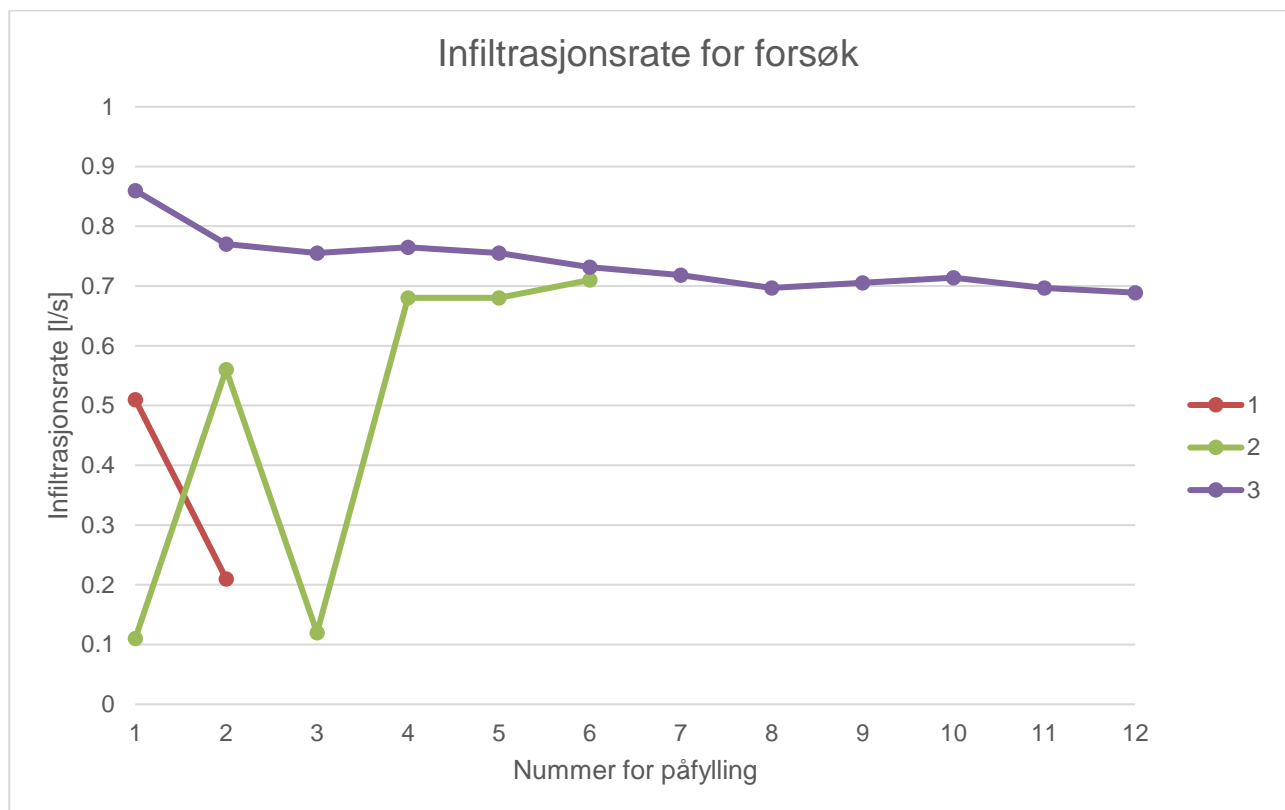
7 RESULTATER OG DISKUSJON

7.1 Trondheim, Tiller

7.1.1 Infiltrasjonkapasitet fra forsøk i kum

Infiltrasjonsraten fra de ulike forsøkene er beregnet på bakgrunn av avtakende vannstand i kummen. Alle beregninger finnes i vedlegg 5. Den avtakende vannstanden er målt over tid. Såfremt pukkvolument rundt kummen er fylt med vann kan en anta at vannmengden som renner ut av kummen går til infiltrasjon i pukkvolument. Fylling av pukkvolument antas ut fra gitte forutsetninger som diskuteres nedenfor.

Resultatene i figur 28 nedenfor viser infiltrasjonsraten for hvert påfylling av vann. De ulike grafene illustrerer ulike forsøk.



Figur 28 Viser infiltrasjonsraten for hvert gjennomførte forsøk.

Den totale mengden som er fylt i kummen i løpet av forsøkene vises i tabell 11.

Tabell 11 Tabellen viser den totale påfylte vannmengden i løpet av de utførte forsøkene. *Kummen var helt tom før påfylling, dermed vil noe av vannet som fylles på lagres under infiltrasjonsrøret i kummen. Dette vannvolumet trekkes derfor fra det påfylt volumet, ettersom det ikke går ut av kummen.

Totalt påfylt vannmengde			
Forsøk	Vannmengde [m ³]	Volum i kum*	Reel påfylt vannmengde
1 (SF18)	1,1	0,6	0,5
2 (SF21)	1,8	0,6	1,2
3 (SF21)	3,5	0,6	2,9

Infiltrasjonsraten som observeres fra de forskjellige forsøkene er svært forskjellige. Resultatene fra forsøk 1 og 2 tyder på at forsøket innehar feil. Til sammenlikning er resultatet fra forsøk 3 av god kvalitet. Forsøket innehar mange påfyllinger slik at pukkvolumet fylles, og avlesningen av synkingen i kummen har bedre nøyaktighet enn i de foregående forsøkene.

Infiltrasjonsgrafene fra forsøk 3 ser ut til å være mer som forventet basert på teori. Grafene samsvarer forholdsvis godt med forventet fasong, og har likheter med en typisk graf for infiltrasjonsrate som en funksjon av $m K_{sat}$ -verdi. Grafene starter med høyere verdier før den gradvis avtar og flater ut. Det flate området på grafene tilsvarer den mettede infiltrasjonsraten. Grafene er kontinuerlig avtakende, men har noen små avvik ved noen av målingene. Dette er trolig målefeil, da nøyaktigheten i forsøket ikke er perfekt, uansett samsvarer trenden i de målte verdiene med forventet resultat.

Diskusjon av de gjennomførte forsøkene:

Når jorden mettes reduseres infiltrasjonskapasiteten, og det var forventet å observere en slik endring i infiltrasjonskapasiteten i løpet av alle forsøkene. Men for forsøkene med få påfyllinger observeres ingen tydelig sammenhengende reduksjon i infiltrasjonsraten gjennom forsøkene. De to første forsøkene har en mye lavere infiltrasjonsrate gjennom forsøkene enn det siste forsøket.

Ved forsøk 3 måles tiden det tar for vannet å synke fra et punkt til et annet punkt, mens i forsøk 1 og 2 noteres vannstanden ved flere tidspunkt under nedsynkingen. Forsøk 3 har dermed færre muligheter for feilmålinger, og forsøket utføres på nøyaktig samme måte for hver nedsynking, noe som sikrer kvaliteten og sammenlikningsgrunnlaget for

de forskjellige målingene. For forsøk 1 og 2 er det gjort for få påfyllinger av vann. Det er ikke fylt på nok vann til å fylle pukkvolument med vann. Det totale pukkvolument som kan aktiveres ved den målte vannstanden i kummen er beregnet til å ha et volum mellom $1,01 \text{ m}^3 - 3,15 \text{ m}^3$. Vannmengden som er påfylt kummen er $0,5 \text{ m}^3$ for forsøk 1 og $1,2 \text{ m}^3$ for forsøk 2. Det kan altså med sikkerhet sies at pukkvolument under forsøket ikke har vært fylt opp med vann. Dette gir en dårligere utnyttelse av kummens kapasitet.

På grunn av værforholdene og mye nedbør i forkant av de to første forsøkene kan det tenkes at jorden allerede var mettet med vann, slik den målte infiltrasjonsraten indikerer allerede mettede forhold. Dette kunne forklart at forsøk 1 og 2 gjennom hele forsøkene har en lavere infiltrasjonsrate enn forsøk 3. I løpet av det tredje forsøket som er utført kan en observere en tydelig reduksjon i infiltrasjonsraten i løpet av forsøket, noe som stemmer overens med teori og forventet resultat. De siste påfyllingene i det tredje forsøket viser en tilnærmet konstant infiltrasjonsrate, og det antas derfor at dette er den stabile infiltrasjonsraten ved mettede forhold. I forkant av det tredje forsøket er det observert en lengre periode med tørt vær, samt at lufttemperaturene har vært høyere enn ved foregående forsøk. Sammenliknet med de to tidligere utførte forsøkene er det betydelig mindre nedbør i perioden før forsøket. Uavhengig av tidligere værhendelser virker det som om resultatene er for ulike. Infiltrasjonsraten er så stabil i løpet av de siste påfyllingene for forsøk 3, at denne infiltrasjonsraten trolig gjengir den mettede infiltrasjonsraten. Det virker usannsynlig at forsøkens forskjell i infiltrasjonsrate skyldes jordens metningsgrad før forsøket.

De to første forsøkene er utført ca. en og to måneder tidligere enn det siste forsøket. I henholdsvis midten av mars, starten av april og midten av mai. Om det hadde vært frost i infiltrasjonsmassene ved de to første forsøkene kunne dette forklart en høyere infiltrasjonsrate i forsøket som er utført i mai. Dette ettersom frost i stor grad påvirke den hydrauliske konduktiviteten til de stedlige massene (Kim H. Paus, 2016). Det har ikke vært mulig å måle om det har vært frost i grunnen under og rundt infiltrasjonsflatene til de aktuelle kummene. Bunnen av infiltrasjonsarealet ligger på en dybde som er 3,29 meter, mens toppen av infiltrasjonsarealet som er aktivert under forøket har en dybde på 1,77 m. Til sammenlikning er frostfri dybde i Trondheim 1,8 meter (VA/Miljø-blad). Det ansees derfor som svært usannsynlig at det effektive infiltrasjonsarealet er påvirket av frost i noen betydelig grad.

Ved forsøk 3 er det fylt på totalt 2,9 m³ til fordrøyningsvolumet. Ved første påfylling ble kummen fylt med vann helt til vannstanden stod til toppen av frostoverløpet. I løpet av oppfyllingen var vannstanden konstant over en periode med påfylling, før vannstanden igjen steg. Ved de neste påfyllingene startet påfyllingen i det vannstanden stod på det samme punktet i infiltrasjonsrøret. I løpet av forsøket var det til enhver tid et vannspeil i infiltrasjonsrøret. Det antas derfor at likevekt oppnås underveis i forsøket og at vannstanden i pukkvolumet dermed er lik vannstanden i kummen. Ettersom det aktiverte fordrøyningsvolumet og infiltrasjonsarealet er ukjent for forsøk 1 og 2, ansees forsøkene som mislykket og analyseres dermed ikke ytterligere.

Forskjell i grunnvannstand kunne vært årsaken til forskjell i infiltrasjonsraten ved de forskjellige forsøkene. Høyt grunnvann kan påvirke infiltrasjonskapasitet (Naturstyrelsen, 2008). Grunnvannstand er ikke målt i forbindelse med disse forsøkene. Men geotekniske rapporter fra Trondheim kommune indikerer ingen kontakt med grunnvannet ved kjerneboringen ned på 5,5 meters dyp (Geoteknisk Seksjon, 1977). Det antas derfor at grunnvannet ikke når en høyde som vil påvirke infiltrasjonskapasiteten til infiltrasjonskummene i området. Dessuten kan det med stor sikkerhet bekreftes at utførelsen av forsøkene med for lite påfylt vann fører til for liten aktivering av pukkmagasinet, og dermed reduseres infiltrasjonsraten i stor grad.

Selv om forsøk 3 ansees som godt utført er det likevel noe usikkerhet i forbindelse med utførelsen av forsøket. Utstyret som benyttes for utførelse av forsøket har liten feilmargin. Vannmåleren har en målenøyaktigheten ned til nærmeste desiliter. Høydemålingen i kummen under forsøk og måling av vannstanden under forsøk har også noe feilmargin. Det antas at avlesningen har en nøyaktighet på +/- 1 centimeter. I volum vil dette bety en unøyaktighet på 7,6 liter. Tidtakingen for påfylling og nedsynkingen av vannet i kummen antas å være 2 sekunder. For en tidtaking mellom 1:04 til 10:28 [min:sek] ansees denne usikkerheten å være ubetydelig. Selv om det er små usikkerheter tilknyttet utføringen og nøyaktigheten ved forsøket ansees nøyaktigheten til forsøket å være god. De største og betydelige usikkerhetene vil uansett være knyttet til pukkvolumet og den stedlige hydrauliske ledningsevnen.

7.1.2 K_{sat} -verdi

Verdien for K_{sat} er avgjørende for den stedlige infiltrasjonskapasiteten. Ved dimensjonering av infiltrasjonsanlegg, ved bruk av en forenklet versjon av Darcy's lov, er K -verdien en av to avgjørende faktorer. Å bestemme K_{sat} -verdien ved prosjektering gjøres med forskjellig praksis i bransjen. Nedenfor er K -verdien for det aktuelle området på Tiller estimert ved bruk av ulike typiske metoder.

Måling av infiltrasjonsrate ved MPD-infiltrometer

Det er som en del av oppgaven utført målinger av K_{sat} -verdi like ved de anlagte infiltrasjonkummene. Målingene gjort med MPD-infiltrometer gir følgende K_{sat} -verdier, vist i tabell 12.

Tabell 12 Viser måleresultatene fra de utførte forsøkene med MPD-infiltrometer.

Prøvenummer	K_{sat} [cm/t]	Beskrivelse
1	111,58	Målt på overflaten
2	54,98	Målt på overflaten
3	150,83	Målt i dypet (60 cm under bakkenivå)
4	27,15	Målt i dypet (60 cm under bakkenivå)
	45,18	Standardavvik
	56%	Variasjonskoeffisienten

Diskusjon av resultat:

Målingene som er gjort i overflaten og i dypet viser ikke store forskjeller. Dette stemmer godt overens med grunnundersøkelsene som er utført i området, ettersom disse ikke viser noe variasjon i de øverste sjiktene av boreprøvene. Visuelle undersøkelser på stedet viser heller ikke noen vegetasjon eller vekstlag i overflaten hvor infiltrasjonen er målt. Ved graving ned til 60 cm dybde ble det ikke observert endring i grunnforholdene. MPD-målingene viser stor variasjon i infiltrasjonskapasiteten. Dette illustreres med en variasjonskoeffisient på 56% og et standardavvik på 45,18.

Selv om prøvene kun er tatt med en avstand på ca. en meter fra hverandre viser de store forskjeller. Det kunne med fordel vært tatt flere prøver. Flere prøver gir et bedre grunnlag

for å kunne si nå om den representative infiltrasjonskapasiteten i området, og med et stort antall prøver kan en oppdage og utelukke eventuelle feilmålinger. På grunn av problemer med måleutstyret og oppgavens tidsavgrensning er det ikke utført flere prøver. Antallet målinger ansees som godt nok for videre beregninger, da variasjonen i slike målinger ofte er svært stor, samt at måleresultatene kun benyttes som veiledende verdier.

Siden måleresultatene gir svært varierende verdier, samt at avstanden mellom høyeste og laveste verdi er betydelig benyttes medianen som en representativ verdi for alle målingene. Målingene som er gjort i dypet ansees som like representative som de som er gjort på overflaten, dermed benyttes samtlige resultater for vurdering av K_{sat} .

Verdier for K_{sat} basert på ulike metoder for det samme aktuelle området finnes i tabell 13.

Tabell 13 Tabellen viser resultatet av K-verdien basert på ulike metoder.

Metode:	[cm/t]
Løsmassekart	198
Grunnboringer	198
Medianverdi av MPD-målinger	83,28

Variasjonen i valgte og målte K-verdier er forholdsvis liten, med tanke på den typiske stedlige variasjon i hydraulisk ledningsevne. Selv om målemetoden i noen tilfeller kan ha små usikkerheter ansees de målte verdiene å være mest korrekt. De målte verdiene benyttes dermed i videre beregninger. Dessuten er de målte verdiene lavere enn de valgte, og gir derfor en noe mer konservativ beregning.

K-verdier basert på løsmassekart, sikteprøver og grunnboringer tar ikke høyde for jordens komprimeringsgrad. Urbane områder er ofte tungt belastet, for eksempel med trafikk, utskiftning av masser og byggevirkosomhet. Dette medfører at jorden komprimeres og porøsiteten samt infiltrasjonskapasiteten til jordsmonnet reduseres (Jin-Ling Yang, 2010). Det er anlagt veg i det aktuelle området, noe som krever omfattende anleggsarbeid. På grunn av anleggsarbeid og områdets bruk er det rimelig å anta at jorden i området er påvirket og kan karakteriseres som urban. Studien utført av J. Yang måler infiltrasjonskapasitet fra jordens overflate. Hvor langt ned en eventuelt komprimering vil påvirke jorden og hvilken påvirkning komprimeringen vil ha på infiltrasjonsevnen til jorden nedover i dypet er ukjent.

MPD-målingene fanger opp effekter av komprimering og egner seg derfor godt til å vurdere infiltrasjonskapasiteten i urbane områder. MPD-målinger som tas på en dybde på 60 cm tar ikke hensyn til topplagets innvirkning på infiltrasjonskapasiteten og kan gi en representativt verdi for infiltrasjonskapasiteten i dypet hvor IFS-kummens infiltrasjonsflate finnes. Resultatet av MPD-målingene gir en dårligere infiltrasjonsevne enn vurderingene fra kart og grunnundersøkelser. Det anbefales derfor å benytte verdier fra infiltrasjonsmålinger for bruk ved dimensjonering og prosjektering. Eventuelt kan en anta konservative K-verdier fra klassifiseringstabellen, vist i figur 14 og 20, men dette er også svært usikkert. Særlig i urbane områder hvor jorden har vært utsatt for betydelig belastning er det viktig å utføre undersøkelser, da en generell klassifisering av K-verdi ikke tar hensyn til jordens komprimering. K-verdiene i tabell 14 benyttes i videre beregninger.

Tabell 14 Tabellen viser K-verdiene som benyttes i videre beregninger.

K-verdi				
Beskrivelse	Nummer	m/døgn	m/sek	cm/time
median	1	19.9872	0.00023133	83.28
prøve 1	2	26.7792	0.00030994	111.58
prøve 2	3	13.188	0.00015264	54.95

7.2 Sandnes, Testfelt til Multiblokk

Forsøket i Sandnes er utført 12.05.2017.

7.2.1 Forsøk med vann i kum

Figur 29 er utskrift fra programvaren til Multiblokk. Figuren illustrer hvordan vannstanden i kummen har endret seg i løpet av det utførte forsøket. Den røde streken gjennom figuren er vannstanden målt med trykkcellen. Utskriften fra programvaren er påført noen hvite streker med tilhørende klokkeslett som indikerer viktige punkter i forsøket. Utskriften finnes også i vedlegg 6.



Figur 29 Utskrift fra programvare som viser resultatene fra forsøket som er utført i Sandnes.

Den første streken indikerer starten på forsøket. Den andre streken viser hvor vannstanden i kummen plutselig stiger. Den tredje streken viser hvor stabil infiltrasjonsrate er oppnådd etter en justeringsperiode, og påfyllingen av vann i kummen stanses. Den siste og fjerde streken viser vannstanden i kummen etter en reduksjon i vannstand over tid. For de to siste strekene er også vannstanden i kummen lest av. Dette for å måle nedsenkningen i kummen, og beregne en infiltrasjonsrate basert på disse målene. Etersom forsøkene på Tiller er utført på tilsvarende måte, med måling av

nedsynking, kan kontrollsjekkede verdier fra Sandnes bekrefte god kvalitet på forsøkene i Trondheim.

Tabell 15, viser påfyllingen av vann i kummen. I tabellen er det spesifisert hvordan påfyllingen justeres over tid og varigheten for den enkelt påfylling. Dermed kan det totale volumet som er påfylt beregnes. Justeringene i påfyllingsrate underveis er gjort for å observere hvordan kummen responderer på ulike vannmengder.

Tabell 15 Tabellen viser påfyllingen i kummen i løpet av forsøket.

Tid	Sekunder	ΔSekunder	l/s	Volum [liter]
0:00:00	0		1.4	
0:02:40	160	160	2.1	224
0:38:20	2300	2140	2.1	4494
0:45:00	2700	400	2.4	840
0:50:00	3000	300	2.6	720
0:55:00	3300	300	2.8	780
1:00:00	3600	300	2.9	840
1:08:00	4080	480	2.9	1392
1:13:00	4380	300	3.0	870
1:14:38	4478	98		294
			Σ	10454

Før kummens kapasitet reduseres til en verdi under påfylt vannmengde, er det fylt på 10454 liter vann. Stabil vannstand oppnås med en påfylling lik 1,3 l/s, og antas derfor å tilsvare infiltrasjonsraten ved mettede forhold. Infiltrasjonsraten under påfyllingen gir følgende verdier, vist i tabell 16 nedenfor:

Tabell 16 Tabellen viser beregninger for infiltrasjonsraten under påfyllingen i forsøket.

		Benevning	Beskrivelse
	10454	liter	Påfylt vannmengde
-	4347	liter	Fordrøyningvolum
=	6107	liter	Infiltrert vannmengde under påfylling
/	4478	sek	Varighet av påfylling
=	1.36	liter/sek	Infiltrasjonsrate under påfylling

Diskusjon av resultater:

Fra forsøkets måleserie ser en at fra perioden for å finne den stabile vannstanden i kummen er det noe ujevnheter i vannstanden. Målet var å komme frem til en påfylling som ga en konstant vannstand over 5 minutter. På grunn av vannmålerens nøyaktighet var det ikke mulig å finne den eksakte påfyllingsraten for å oppnå dette. Påfylling med 1,4 l/s gav en liten økning av vannstanden i kummen, mens påfylling på 1,3 l/s gav en liten reduksjon av vannstanden. Stabil infiltrasjonsrate er dermed ett sted mellom 1,3 l/s og 1,4 l/s. 1,3 l/s benyttes til videre beregninger.

Under forsøkets påfylling av vann beregnes infiltrasjonsraten til å være 1,36 l/s, se tabell 16. At den gjennomsnittlige infiltrasjonsraten som observeres under påfyllingen er noe større enn infiltrasjonsraten ved mettede forhold er sannsynlig. Den hydrauliske kapasiteten til de stedlige massene vil avta etter hvert som de mettes med vann, og infiltrasjonsraten ved tørre forhold vil være betydelig større enn ved mettede forhold. I begynnelsen av påfyllingen vil imidlertid ikke hele det tilgjengelige infiltrasjonsarealet bidra til infiltrasjon, da vannstanden trolig ikke har noen betydelig høyde i pukkmagasinet.

Utførelse av forsøket:

Det er kun utført ett forsøk i Sandnes, noe som gir lite sammenlikningsgrunnlag. Ideelt sett burde forsøket vært utført på samme måte minst en gang til for å validere forsøket og avdekke eventuelle målefeil. På grunn av oppgavens varighet har ikke dette latt seg gjøre.

Stormaqua har ikke noe produktblad for vannmåleren. Vannmåleren oppgir vannstrømningen i 0,00 l/s, dette gir avlesningen en nøyaktighet på 0,0005 l/s. Det antas at vannmålerens nøyaktighet er bedre enn dette. Denne nøyaktigheten antas å være tilstrekkelig. Vannmåleren har imidlertid ingen «hukommelse», så måleserien logges ikke. Dette innebærer at tiden for hver endring i mengderegulering noteres manuelt. Dette gir usikkerhet i tidsnoteringen, men antakeligvis vil ikke usikkerheten være større enn +/- 1-3 sekunder. Denne feilmarginene er så liten, og mengdereguleringen skjer så sjeldent at eventuelle uriktige tidsobservasjoner kan neglisjeres.

Trykksensoren i bunnen av kummen har god målenøyaktighet, i løpet av forsøket reagerer trykksensoren på 1 mm endring i vannstanden og målingene er vedvarende over tid. Det er ikke observert noe støy på målingene under forsøket. Trykksensoren er ikke

kalibrert korrekt før forsøket, og oppgir derfor feil høyde på vannstanden. Feilen er konstant og korrigeres ved å addere den konstante differansen på alle avlesninger, dermed elimineres feilen. Differansen er observert ved manuelle målinger av vannspeilet.

I løpet av forsøket fylles kummen konstant i 1 time og 48 minutter. Dette, samt det store volumet som er påfylt sikrer at pukkvolumet er fylt med vann. Det observeres at det står ett vannspeil i infiltrasjonsrøret når vannstanden er konstant. I følge prinsipp om likevekt indikerer dette at vannstanden i pukkmagasinet når samme høyde som i kummen. Etersom påfyllingen skjer over så lang tid er det rimelig å anta likevekt.

Selv om det bare er data fra ett forsøk vurderes disse resultatene til å være pålitelige på grunn av liten usikkerhet ved forsøksmetoden. Ved analysing av forsøket er det fordrøyningsvolum og infiltrasjonsareal samt den hydrauliske konduktiviteten til de stedlige massene det er knyttet størst usikkerhet til.

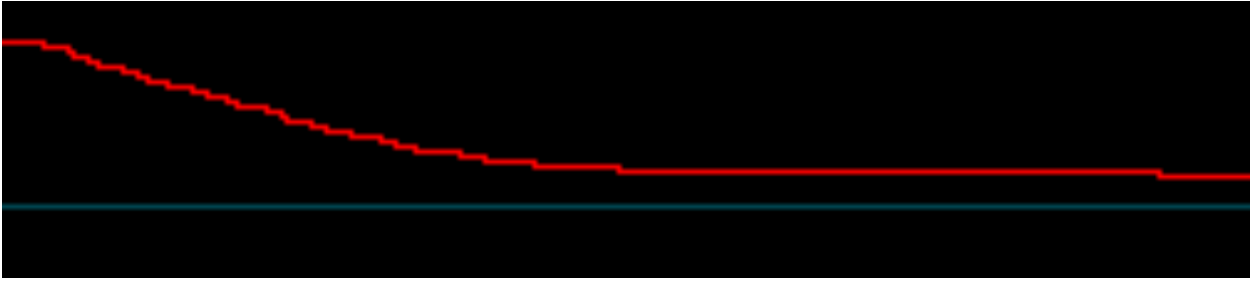
7.2.2 Ytterligere beregninger av infiltrasjonsrate

For å bekrefte infiltrasjonsraten som er observert under forsøket og for å oppnå noe likhet for forsøkene i Trondheim og i Sandnes er tiden det tar for vannet å synke i kummen målt.

Denne målingen gir en reduksjon i volum lik 55,87 liter over en tidsperiode på 5 minutter og 33 sekunder. Dette gir en infiltrasjonsrate på 0,16 l/s.

Diskusjon av resultatet:

Infiltrasjonsraten som måles ved nedsynkingen i forsøket er betydelig mindre enn den som måles ved konstant tilførsel av vann og ved et konstant vannspeilet i kummen. Ved nedsynking avtar vannstanden i infiltrasjonsdykkeren og vannmengden som tilføres pukkvolumet reduseres på grunn av mindre vanntilførsel i dykkeren. Det ansees som svært sannsynlig at mindre infiltrasjonsrate observeres på grunn av redusert vanntilførsel til dykkeren. På grunn av overnevnte faktorer ansees verdien som falsk og benyttes ikke i videre beregninger.



Figur 30 Viser hvordan vannstanden i kumme avtar etter at påfyllingen av vann i kummen er stoppet. Bildet er et utklipp og en forstørrelse av figur 29.

Figur 30 viser hvordan høyden i kummen avtar når påfyllingen av vann stoppes. Det er tydelig at grafen slakker ut, og at stigningstallet er størst i starten. Dette bekrefter påstanden om at infiltrasjonsraten synker når dykkeren gradvis fylles med mindre vann. Dette indikerer at forsøket på Tiller i Trondheim resulterer i en infiltrasjonsrate som er mindre enn kummens kapasitet, ettersom infiltrasjonsraten er målt med forsøk som baserer seg på nedsynking og at dykkerens fyllingsgrad delvis avtar underveis i forsøket.

7.3 Ytterligere beregninger

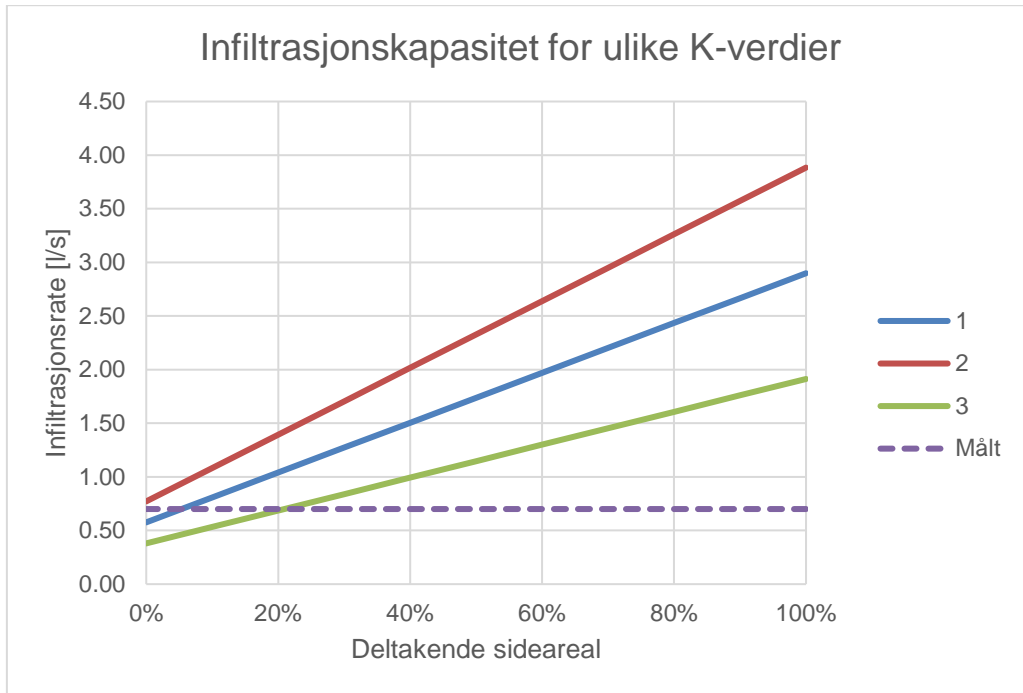
De følgende ytterligere beregningene gjelder for forsøk 3 i Trondheim og forsøket i Sandnes.

7.3.1 Sammenlikning av infiltrasjonsrate, K -verdi og effektivt sideareal

De alternative K -verdiene plottes i en graf som en funksjon av effektivt infiltrasjonsareal. Dette gir 3 grafer i samme diagram. Den målte infiltrasjonsverdien plottes også som en stiptet linje i samme diagram. Skjæringspunktet mellom målt verdi og eventuelle kryssende grafer leses av.

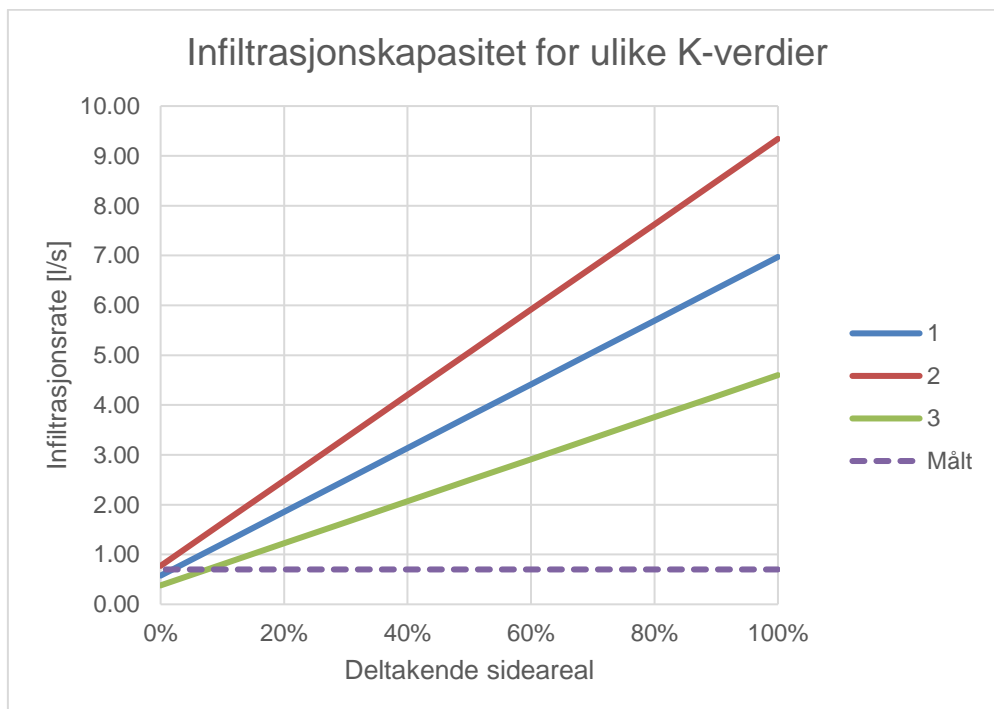
De følgende beregningene gjelder for forsøk 3 utført i infiltrasjonskum på Tiller i Trondheim. Dette gjøres for alle alternative arealberegninger og resultatene finnes i figur 32 – 35. Alternativene er ytterligere beskrevet i kapittel 5 «Beskrivelse av forsøksfelt».

- Alternativ 1



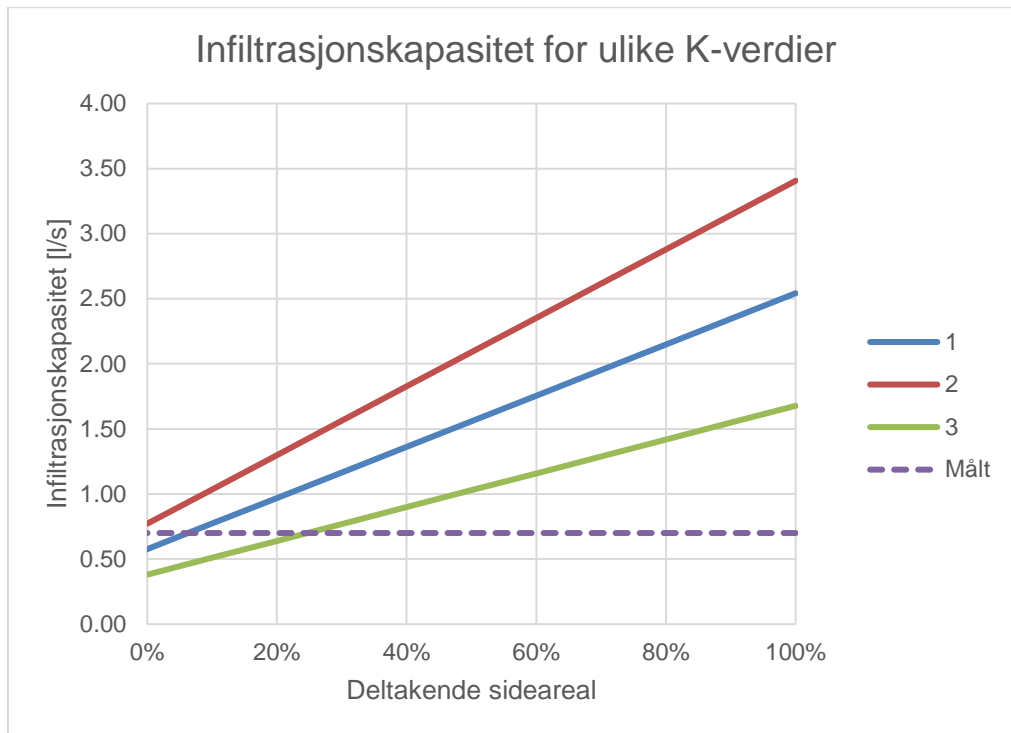
Figur 31 Diagrammet viser resultatene fra beregninger og utført forsøk i Tiller. Beregninger for alternativ 1.

- Alternativ 2



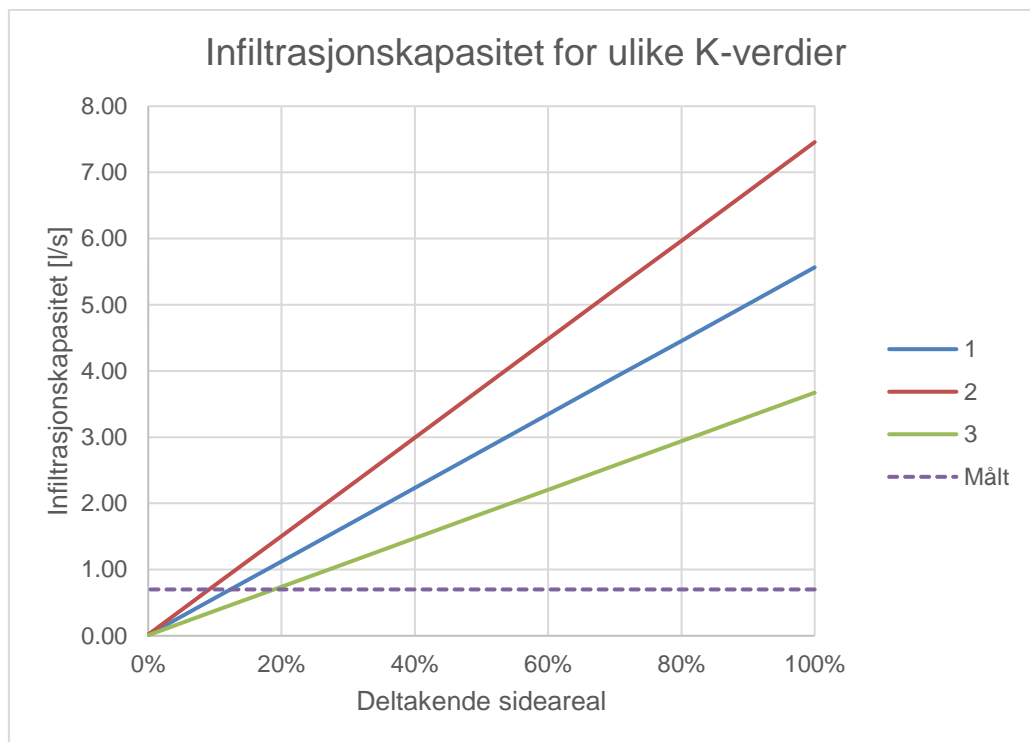
Figur 32 Diagrammet viser resultatene fra beregninger og utført forsøk i Tiller. Beregninger for alternativ 2.

- Alternativ 3



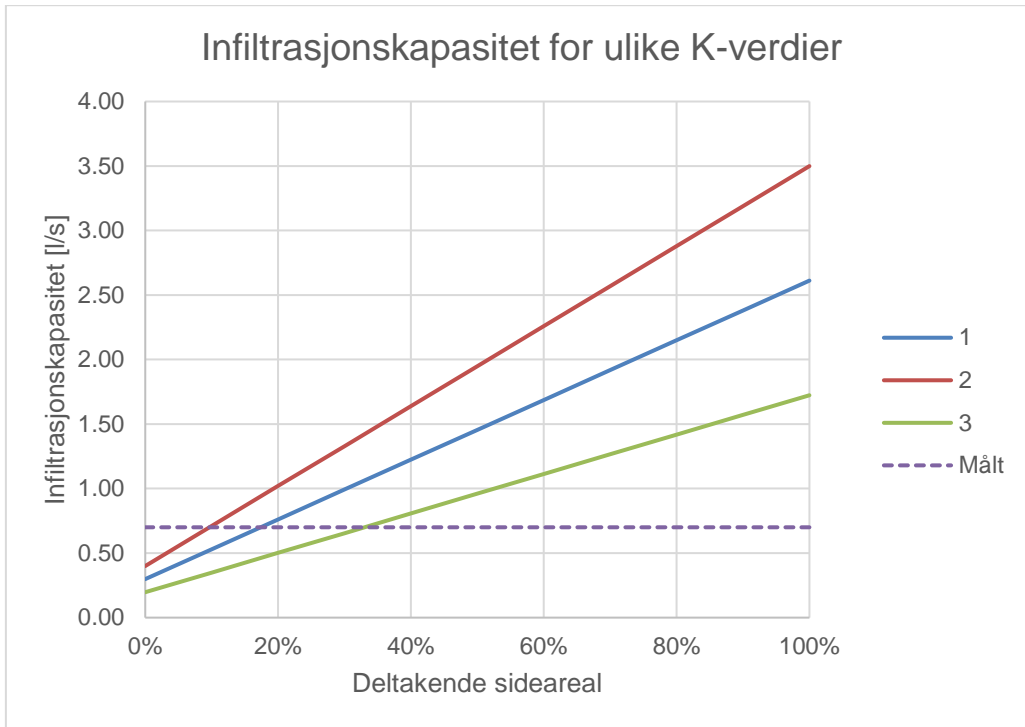
Figur 33 Diagrammet viser resultatene fra beregninger og utført forsøk i Tiller. Beregnigner for alternativ 4.

- Alternativ 4



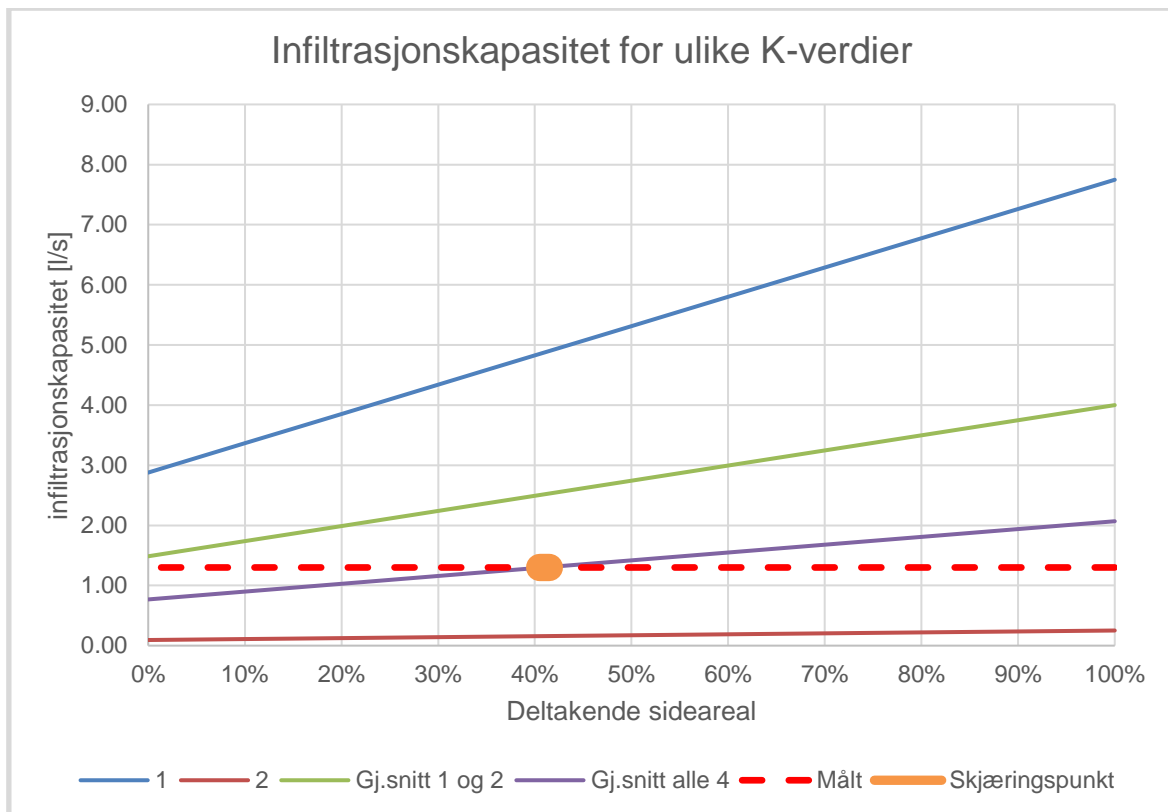
Figur 34 Diagrammet viser resultatene fra beregninger og utført forsøk i Tiller. Beregnigner for alternativ 4.

- Alternativ 5



Figur 35 Diagrammet viser resultatene fra beregninger og utført forsøk i Tiller. Beregninger for alternativ 5.

Påfølgende resultat, vist i figur 36, gjelder for forsøket som er utført på testfeltet til Mutliblokk i Sandnes. For forsøket i Sandnes er det beregnet fire alternative K-verdier, nærmere beskrevet i kapittel 4 Feltbeskrivelse.



Figur 36 Diagrammet viser resultatene fra beregninger og utført forsøk i Sandnes.

Diskusjon av resultat:

Grafene i figurene viser hvordan kummens infiltrasjonskapasitet øker med en økning i deltakende infiltrasjonsareal i sideskråningene av grøften. De ulike grafene illustrerer ulike valg av K_{sat} -verdi. Den stiplede linjen illustrerer den målte infiltrasjonskapasiteten til infiltrasjonskummen. Fra figurene fra forsøkene i Trondheim ligger skjæringspunktene for de ulike grafene på verdier mellom 0-30%. Mens for forsøket i Sandnes er skjæringspunktet til sammenlikning på 41%.

For forsøket i Sandnes viser figur 38 viser at den målte infiltrasjonskapasiteten kun samsvarer med en graf. Den ene grafen illustrerer infiltrasjonskapasiteten basert på den gjennomsnittlige K -verdien for alle 4 målingene i feltet. Grafene samsvarer hvor det totale arealet for sideskråningene infiltrerer 41%. Grafen som viser gjennomsnittet av måling 1 og 2 samsvarer nesten med den målte verdien for infiltrasjonskapasitet. Dette skjer i punktet hvor 0% av sideskråningene bidrar til infiltrasjon. Selv om det ikke skjer en direkte krysning mellom grafene er det knyttet noe usikkerhet til infiltrasjonsarealene, ettersom flere av beregningene baseres på flere antakelser. Samsvar mellom grafene kan derfor

være sannsynlig. De to andre grafene er så langt fra den målte verdien at krysning er mindre sannsynlig.

Ettersom både K_{sat} -verdien og volum- og arealberegningene innehar usikkerheter vil det også være noe usikkerhet i disse beregningene som beregnes på bakgrunn av usikre verdier. Likevel antas det som sannsynlig at den effektive infiltrasjonen i sideskråningene er mellom 30-50%. Dette er basert på resultatene fra forsøket i Sandnes. Resultatene indikerer at forsøket i Trondheim viser noe lave infiltrasjonsverdier, noe som stemmer overens med antakelse om at forsøket begrenses av vannmengden som tilføres dykkeren. På bakgrunn av antakelsen om at den beregnede infiltrasjonsraten for kummene i Trondheim er for lav, kan det resultere i at beregninger fra Trondheim viser en deltakelse av sideareal som er mindre enn den opptredende. Denne antakelsen kan bekrefte det effektive arealet fra Sandnes, da dette er noe høyere. Det kan også være andre forhold, utenfor forsøkets kontroll, som kan spille inn og påvirke resultatene.

At verdien er sannsynlig er med på å bekrefte at også K_{sat} -verdien og infiltrasjonsarealet fra forsøket i Sandnes er tilnærmet riktig. Den mest representative K_{sat} -verdien er gjennomsnittet av alle målingene på feltet. Verdiene sannsynliggjør at forsøket i Trondheim resulterer i for lav infiltrasjonsverdi.

7.4 Optimale forsøk

Overstående vurderinger og analyseringer av de utførte forsøkene viser at samtlige forsøk har rom for forbedringer.

7.4.1 Trondheim, Tiller

Det optimale forsøket på Tiller vil være et forsøk hvor dykkeren til enhver tid er fullstendig fylt med vann. Å måle infiltrasjonsraten ved å måle avtakende vannstand i kummen kan gi gode resultater såfremt dykkeren til enhver tid er fylt med vann. Når vannstanden i dykkeren synker avtar også vannmengden som føres inn i pukkvolumet og det gir derfor falske resultater.

Utførelsen av forsøket i Sandnes ansees å være tilnærmet optimal og med få justeringer kunne et tilsvarende forsøk utføres på Tiller. Dette krever en vannpåfylling som er mer nøyaktig enn den var ved utførte forsøk. Ved å montere en elektronisk vannmåler på utløpet av vannslangen som kan måle vannføringen til enhver tid blir nøyaktigheten

bedre. En slik vannmåler som også loggfører målingene over tid kan benyttes til å beregne det totale påfylte volumet til enhver tid. For å måle konstant vannstand i kummen på Tiller kunne det vært gjort nedmål til vannflate ved hjelp av for eksempel lasermåler.

Utløpsrøret fra kummen skal etter forskrift ligge i en pukkgroft, og ha et fundament på 150 mm. Det kan dermed tenkes at noe av vannet fra forsøket kan finne veien til dette pukkvolumet såfremt vannstanden i pukkvolumet blir så høy at den når dette pukkvolumet. Røret og pukkgroften leder videre til en ledningstrase for vann, spillvann og overvann. Om pukkvolumet i ledningstraseen aktiviseres kan det tenkes at vannet forsvinner i pukkgroften, og kummen får et enormt fordrøyningsvolum. Ved kapasitetsforsøk av kummen bør derfor vannstanden i kummen være lavere enn 150 mm under overløpet, for å forhindre at vannet tar den veien.

7.4.2 Sandnes, Multiblokk

Forsøket i Sandnes ansees å være tilnærmet optimalt. Forsøket burde likevel vært utført flere ganger for å oppdage eventuelle målefeil, men har ikke latt seg gjøre på grunn av oppgavens tidsavgrensning. En forbedring ved utføringen av forsøket vil være å inkludere vannmåleren i måleprogrammet, slik at påfylt vannmengde loggføres og kan leses av også etter utført forsøk. Dette vil øke nøyaktigheten i vannmengdeavlesninger.

Å gjøre forsøk som gir gode og entydige K-verdier er vanskelig. Optimalt burde det vært utført målinger i infiltrasjonsflaten til kummene. Dette er ikke mulig etter bygging, men for fremtidig forskning anbefales dette.

Kummen i Sandnes har ikke noe overløp som leder ut av pukkmagasinet som må tas hensyn til ved forsøket.

7.5 Andre observasjoner

Som-bygget-tegningene for infiltrasjonskummene som er anlagt på Tiller i Trondheim er mangelfulle. Tegningene har få og lite spesifikke beskrivelser av hvordan groften rundt kummen og det omfylte pukkvolumet skal utformes. På grunn av få spesifiseringer er det stor usikkerhet knyttet til fordrøyningskapasiteten og infiltrasjonsarealet, begge er faktorer som er avgjørende for kummens kapasitet. De fem alternative beregningene av infiltrasjonsareal og fordrøyningsvolum illustrerer at beskrivelsen fra byggetegningen er lite entydig og har stor variasjon. Ved forsøk på den ene kummen på Tiller ble det

observert at infiltrasjonsdykkeren stod høyere enn kummens overløp. Dette hindret kummens funksjon, da alt vannet gikk i overløp før noe som helst ble ført inn i pukkvolumet. Målte høyder i begge kummene det er utført forsøk på samsvarer ikke med byggetegningene. Høydene vil ha innvirkning på aktiveringen av pukkmagasinet ved nedbørshendelser og påvirker dermed kummens kapasitet.

At som-bygget-tegningene er lite spesifikke og ikke fastsetter bestemmelser som er betydelig for kummens kapasitet tyder på mangelfull kunnskap om produktet ved prosjektering. Når infiltrasjonsdykkeren i kummen monteres feil tyder det på at det som har bygget anlegget har for liten kunnskap om produktet til å forstå dets funksjon. Det at slike byggefeil ikke oppdages når anlegget ferdigstilles tyder også på svakheter ved kontrollen.

Heller ikke i byggetegningene for infiltrasjonskummen i Sandnes er det spesifisert noen skråningshelning på utgravingen. I likhet med byggetegningene for infiltrasjonskummene på Tiller i Trondheim er byggetegningen for den aktuelle kummen i Sandnes mangelfull. Byggetegningene burde hatt spesifisert skråningshelningen på utgravingen og det kunne med fordel vært høydeangivelser på infiltrasjonsdykkeren, samt overløpet. Dette er beskrivelser som er avgjørende for kummens funksjon og kapasitet. Også i Sandnes tyder det på at kunnskapen om produktet har vært mangelfull ved prosjekteringen.

Infiltrasjonsrøret er tilsvarende for alle tre kummene det er utført forsøk i. Røret som fører vannet til pukkvolumet er utformet som en dykker og har en diameter på 100 mm. Under forsøkene observeres ikke røret å være noen begrensende faktor for kummens kapasitet.

7.6 Kapasitetsberegninger

De ytterligere beregningene er basert på resultatene fra forsøket som er utført i Sandnes, da dette forsøket ser ut til å være best utført og ha de mest korrekte resultatene.

7.6.1 Regnenvelopmetode

En metode for å beregne nødvendig volum for fordrøyning av overvann er regnenvelopmetoden. Regnenvelopmetoden benytter IVF-kurver, og antar dermed kasseregn, for å beregne massebalansen i vannmagasinet. For å beregne balansen i magasinet må utløpskapasiteten være kjent. Metoden kan benyttes for å beregne nødvendig fordrøyningvolum i infiltrasjonskummer. For å benytte regnenvelopmetoden

må dimensjonerende nedbørshendelse være kjent, samt magasinets utløpskapasitet (Lindholm, 2015).

Metoden benyttes for å sjekke kapasiteten til kummen i Sandnes, og vurderer kapasiteten mot dimensjonerende nedbørshendelse. For beregningene benyttes verdiene og resultatene fra forsøket. Følgende verdier benyttes for beregninger:

- Utløpskapasitet: 1,3 l/s
- Returperiode for nedbør 20 år
- Nedslagsfeltet sette til 500 m²
- Det antas at områdets avrenningskoeffisient er 0,9
- Klimafaktor 1,4 benyttes

Beregningene gir følgende resultater, vist i tabell 17.

Tabell 17 Tabellen viser resultat av beregningene fra regnenvelopmetoden.

Returperiode	Intensitet	Varighet	Varighet	Redusert areal	Volum	Utløpskapasitet	Utløpsvolum	Differanse
[År]	[l/s*ha]	[min]	[sek]	[Ha]	[Liter]	[l/s]	[Liter]	[Liter]
20	570	1	60	0.045	2154.6	1.3	78	2076.6
20	425	1.5	90	0.045	2409.8	1.3	117	2292.75
20	340	2	120	0.045	2570.4	1.3	156	2414.4
20	290	3	180	0.045	3288.6	1.3	234	3054.6
20	280	4	240	0.045	4233.6	1.3	312	3921.6
20	260	5	300	0.045	4914	1.3	390	4524
20	215	7.5	450	0.045	6095.3	1.3	585	5510.25
20	180	10	600	0.045	6804	1.3	780	6024
20	140	15	900	0.045	7938	1.3	1170	6768
20	110	20	1200	0.045	8316	1.3	1560	6756
20	85	30	1800	0.045	9639	1.3	2340	7299
20	70	40	2400	0.045	10584	1.3	3120	7464
20	65	50	3000	0.045	12285	1.3	3900	8385
20	50	75	4500	0.045	14175	1.3	5850	8325
20	40	100	6000	0.045	15120	1.3	7800	7320
20	33	150	9000	0.045	18711	1.3	11700	7011
20	28	200	12000	0.045	21168	1.3	15600	5568
20	23	300	18000	0.045	26082	1.3	23400	2682
20	19	400	24000	0.045	28728	1.3	31200	-2472
20	17	500	30000	0.045	32130	1.3	39000	-6870
20	14	750	45000	0.045	39690	1.3	58500	-18810
20	12	1000	60000	0.045	45360	1.3	78000	-32640

Den største differansen er 8385 liter, altså 8,385 m³. Dette er det nødvendige fordrøyningsvolumet for at kummen kan håndtere en nedbørshendelse med ett gjentaksintervall på 20 år, forutsatt en klimafaktor på 1,4.

I følge volumberegningene er fordrøyningsvolumet til kummen 8,385 m³.

*Nødvendig fordrøyningsvolum 8,385 m³ > 4,347 m³ Beregnet fordrøyningsvolum **

*beregnet fordrøyningsvolum refererer til fordrøyningsvolumet som er aktivt under forsøket. Det totale tilgjengelige volumet og den totale kapasiteten til kummen vil være større.

Ved bruk av en klimafaktor på 1,2 er det nødvendige fordrøyningsvolumet 6,630 m³, også dette er overstiger kummens kapasitet under forsøket.

Diskusjon av resultater

I følge beregningene kan ikke kummen håndtere en hendelse med 20 års gjentaksintervall. Beregningene baserer seg på resultatene fra forsøket. Under forsøket var ikke hele kummens kapasitet utnyttet. I følge som-bygget-tegningene har kummen et større pukkvolum, noe som betyr at infiltrasjonskapasiteten samt fordrøyningsvolumet til kummen totalt sett er større. Kummens maksimale kapasitet er ikke interessant ved analyseringen av disse forsøkene, ettersom analyseringen kun er ment for å illustrere metoden.

Diskusjon av regnvelopmetoden

Regnvelopmetoden er en enkel metode som benyttes til å dimensjonere fordrøyningsmagasiner. Metoden trenger få inngangsparametere, og er derfor svært anvendbar. For å benytte regnvelopmetoden direkte må en vite fordrøyningsmagasinets utløpskapasitet, vannmengden som tilføres magasinet, samt dimensjonerende returperiode for nedbør, en lokal IVF-statistikk og klimafaktor. Vannmengden som tilføres magasinet beregnes ved dette eksempelet ved den rasjonelle metode, dette krever at en vet kummens nedslagsfelt samt overflate-type som utgangspunkt for å anslå en midlere avrenningskoeffisient for feltet.

7.7 Dimensjonering

Framgangsmåte og metode som anbefales for å dimensjonere infiltrasjonskummen for å oppnå tilstrekkelig kapasitet for en dimensjonerende hendelsen beskrives i dette kapitlet.

7.7.1 Dimensjoneringsmetode

De utførte forsøkene, samt analyseringen av resultatene viser hvordan kummens kapasitet påvirkes av ulike faktorer. De viktigste faktorene for kummens kapasitet som avdekkes i forsøkene er:

- Den stedlige hydrauliske ledningsevnen.
- Pukk volumets utforming, da dette er avgjørende for
 - fordrøyningsvolumet og
 - infiltrasjonsarealet.

Kummens nedbørsfelt og reduserte areal må beregnes. Typisk dimensjoneres sandfang for å håndtere vegarealer på 300-500 m².

Det må tas stilling til dimensjonerende gjentaksintervall som skal benyttes for dimensjoneringen. I følge 3-leddsstrategien til Norsk Vann, anbefales det at alle nedbør større enn 20 mm håndteres ved infiltrasjonsløsninger. Videre spesifiseres det at gjentaksintervallet må tilpasses de stedlige forholdene. De aktuelle kummene det er utført forsøk på i oppgaven håndterer kun vann som er en direkte avrenning fra vegareal. Dette gir svært stor avrenning for små arealer. Skjæveland setter dimensjonerende gjentaksintervall til 20 år når de er med som rådgivere på anlegg hvor infiltrasjonsbaserte kumløsninger inngår i overvannshåndteringen (Møller-Pedersen, 2017). Det beste valget av gjentaksintervall er det gjentaksintervallet som gir den beste samfunnsøkonomiske besparelsen og burde ideelt sett vurderes i hver enkelt utbygging (Ødegaard, 2012).

Den eneste faktoren som ikke kan påvirkes ved dimensjoneringen er den stedlige hydrauliske kapasiteten. Denne må derfor finnes i forkant av prosjekteringen. Verdien kan estimeres fra ulike kilder slik som løsmassekart og grunnundersøkelser, men disse gir store usikkerheter. Det anbefales derfor at det gjøres målinger i det aktuelle området for utbygging av kumløsningen(e). Målinger med MPD-infiltrrometer gir gode verdier og er enkelt å gjennomføre. For å få reelle verdier burde målingen utføres under jordens

vekstlag, typisk ansees 60 cm under bakkenivå som et god dybde for målinger i dypet (Solheim, 2017).

Før en beregner kapasitet med regnenvelopmetoden må det settes noen forutsetninger for dimensjoneringen av selve kummen. Hvor høyt det skal tillates at vannet står i kummen er avgjørende for utformingen og aktiveringen av det omkringliggende pukkvolumet.

For å beregne kummens infiltrasjonskapasitet benyttes en noe forenklet versjon av Darcy's setning. Den forenklete formelen tar ikke hensyn til vannets trykkehøyde. Denne setningen innehar kun faktorer vedrørende hydraulisk ledningsevne K , og infiltrasjonsarealet A .

Infiltrasjonsraten Q :

$$Q = K_{sat} * A$$

Hvor Q er infiltrasjonsraten [m^3/s], K_{sat} er den hydrauliske kapasiteten [m/t] og A er det effektive infiltrasjonsarealet [m^2].

Resultatene fra forsøkene bekrefter at denne formelen gir realistiske resultater. K_{sat} -verdien burde som nevnt ovenfor finnes fra målinger i felt. Mens infiltrasjonsarealet avhenger av kummens utforming. For bunnarealet i grøften ansees hele arealet som 100% effektivt. Forsøkene viser at det vil være en god antakelse å anta et effektivt infiltrasjonsareal mellom 30 – 50% av arealet i sideskråningene. Porøsiteten i pukken antas å være mellom 0,30-0,40. Ved å benytte 0,35 til dimensjonering kan en ta høyde for fremtidig sedimentering av partikler i fordrøyningsvolumet.

Regnenvelopmetoden egner seg godt til videre prosjektering. IVF-kurven for området, finnes i vedlegg 7, benyttes til å beregne det totale volumet nedbør for ulike nedbørsvarigheter ved det samme gjentaksintervallet. Dette i samsvar med de første 6 kolonnene i tabell 17, illustrert i tabell 18.

Tabell 18 Tabellen illustrerer hvordan dimensjonerende nedbørshendelse er omregnet til dimensjonerende volum for ulike varigheter.

Retur- periode	Intensitet	Varighet	Varighet	Redusert areal	Volum
[År]	l/s*ha	[Min]	[Sek]	[Ha]	[liter]
20	570	1	60	0.045	1539
20	425	1.5	90	0.045	1721.25
20	340	2	120	0.045	1836
20	290	3	180	0.045	2349
20	280	4	240	0.045	3024
20	260	5	300	0.045	3510
20	215	7.5	450	0.045	4353.75
20	180	10	600	0.045	4860

Det må foreslås en utforming av kummen og tilhørende pukkmagasin. Det totale fordrøyningsvolumet, samt infiltrasjonsarealet beregnes. Det effektive infiltrasjonsarealet multipliseres så med K_{sat} -verdien for å finne infiltrasjonsraten til kummen.

Det må bestemmes hvordan kummen skal håndtere vannmengdene, det må vurderes hvor mye vann som kan sendes i overløp i løpet av hendelsen. Ulike dimensjoneringskriterier vil sette krav til kummens høyeste vannstand. Vannstanden inne i kummen kan stige til høyden på overløpet i kummen. Dette gir den høyeste mulige vannstanden i kummen og dermed kummens største kapasitet med tanke på fordrøying og infiltrasjon. Men det er uheldig at vannstanden i kummen stiger over infiltrasjonsrørets frostoverløp, da dette vil føre flytepartikler fra vannet inn i pukkmagasinet. Flere studier viser at slike flytepartikler vil legge seg på infiltrasjonsflaten og over tid redusere installasjonens infiltrasjonsevne betydelig (M. Bergman, 2011). Om frostoverløpet overstiges kun i forbindelse med betydelige nedbørsendelser som 10 år og 20 års hyppighet, kan dette i mange tilfeller ansees å være akseptabelt.

Det beregnede fordrøyningsvolumet og den totale infiltrasjonen blir til sammen kummens kapasitet i løpet av hendelsen. Kapasiteten sammenliknes med volumet av hendelsen. Såfremt volumet av kummens kapasitet er større en hendelsen har kummen tilstrekkelig

kapasitet. Det anbefales å benytte regneark for rask beregning og enkel tilpasning av volum og tilhørende areal.

7.7.2 Viktige faktorer ved dimensjonering

Andre faktorer som må tas hensyn til ved prosjekteringen:

- Fiberduk

For å gjøre fremtidig vedlikehold noe enklere anbefales det å benytte fiberduk mellom pukkvolumet og de stedlige massene. Fiberduken må ha større permeabilitet enn de stedlige massene for å ikke redusere infiltrasjonskapasiteten.

- Vedlikeholdsbehov

Sandfanget må tømmes med jevne mellomrom. Dette burde planlegges i forkant så det med sikkerhet utføres.

- Plasseringen av kummen

Å plassere kummen utenfor vegarealet kan gjøre fremtidig vedlikehold enklere. Det er viktig at sandfanget plasseres slik at det er tilgjengelig for tømning med tilgjengelig tømmeutstyr. Trolig må fiberduken skiftes ut etter en viss driftstid, og hele kummen graves opp. Dette må, en så godt det lar seg gjøre, sørge for at er mulig å gjøre når behovet melder seg.

- Frostfritt

At hoveddelen av infiltrasjonsarealet befinner seg under frostfri dybde vil være en sikkerhet for å sikre gode infiltrasjonsforhold også vinterstid.

- Grunnvann

Grunnvannsstanden i det aktuelle området bør vurderes. Grunnvannet må stå så dypt at det ikke påvirker infiltrasjonen og perkolasjonen i det aktuelle området. At grunnvannet har en dybde på 2,5 meter under infiltrasjonsarealet ansees å være sikkert (Naturstyrelsen, 2008).

- Tørketid

For infiltrasjonsanlegg settes det ofte som dimensjoneringskriteria at hele anlegget skal tørke i løpet av et døgn (G. Freni, 2009). Dette for å forsikre at anleggets kapasitet er maksimal når neste nedbørshendelse inntreffer.

7.8 Dimensjoneringseksempel

7.8.1 Eksempel

Dette beregningseksempellet er ment å være veiledende og illustrere beregningene som kan benyttes til dimensjonering av infiltrasjonssandfang. Grøften og pukkvolument må tilpasses stedlige og geologiske forhold.

Det foreslås følgende utforming av kummen:

- IFS-kum $\varnothing 1000$ benyttes
- Radius bunn grøft = radius kum + 300 mm
- Kummen står på en pukkpute som er 500 mm tykk
- Grøften/pukkvolument har en skråningshelning lik 1:1
- Hulrommet under kummen er 100 mm høyt og like bredt som kummen
- Infiltrasjonsdykkeren ligger 1000 mm over bunn kum
- Dykkerrøret er 100 mm
- Avstanden fra bunn vertikal infiltrasjonsdykker til overløpet er 250 mm

Når vannstanden i kummen er på sitt maksimale, uten at noe vann går i overløp har kummen og omkringliggende pukkvolument følgende egenskaper. Infiltrasjonsarealet finnes tabell 19 og fordrøyningvolument i tabell 20:

Infiltrasjonsareal

Tabell 19 Infiltrasjonsareal for alternativ utforming av kumløsning.

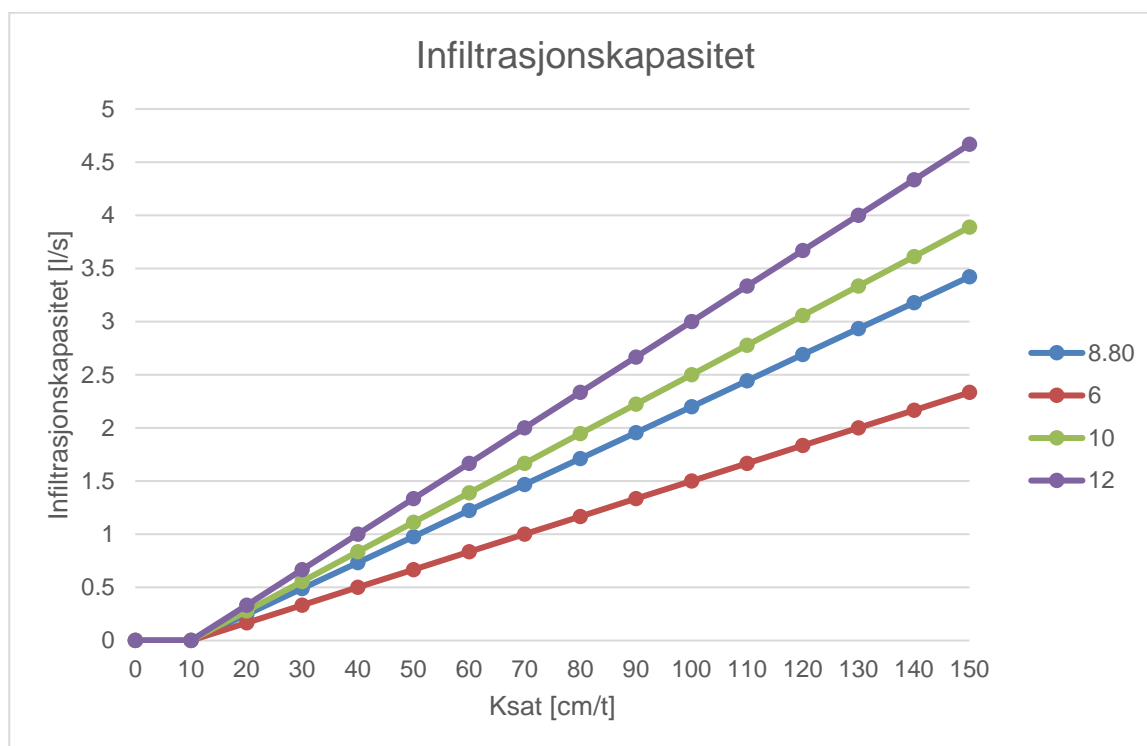
Infiltrasjonsareal			
	2.49	m ²	Areal bunn
+	19.35	m ²	Areal sideflater
=	21.84	m²	Totalt infiltrasjonsareal

Fordrøyningsvolum

Tabell 20 Fordrøyningsvolum for alternativ utforming av kumløsning.

Fordrøyningsvolum			
	23	m ³	Volum pukk
-	1.57	m ³	Volum kum
=	21.43	m ³	
x 0.35 =	7.50	m ³	Effektivt volum pukk
+	0.08	m ³	Volum hulrom
=	7.58	m³	Totalt fordryningsvolum

Kummens infiltrasjonskapasitet vil avhenge av den stedlige hydrauliske konduktiviteten, K_{sat} . Det er i figur 37 illustrert hvordan ulike verdier for K_{sat} påvirker infiltrasjonskapasiteten til kummen. Det antas at det effektive infiltrasjonsarealet i sideskråningene er 40%. Dette gir et totalt effektivt infiltrasjonsareal på 8,80 m², og illustreres med den blå streken i figuren under. De andre grafene er ment for å illustrere sammenhengen mellom infiltrasjonsareal, K_{sat} og infiltrasjonskapasitet.



Figur 37 Infiltrasjonsraten som en funksjon av K_{sat} -verdi og effektivt infiltrasjonsareal.

Infiltrasjonskapasiteten i løpet av den dimensjonerende regnhendelsen er sammen med fordrøyningvolumet infiltrasjonssandfangets totale kapasitet.

Regnenvelopmetoden benyttes for å beregne kummens infiltrasjonskapasitet for de ulike varighetene av den dimensjonerende nedbørshendelsen, samt de totale volumet nedbør for varighetene. Den største forskjellen mellom kummens infiltrasjon i løpet av hendelsen og hendelsen totale volum blir dimensjonerende for fordrøyningvolumet. Regnenvelopmetoden er ytterligere forklart i kapittel 6.9.1 Regnenvelopmetode.

For å oppnå en høyere kapasitet for infiltrasjonssandfanget kan pukkvolumet utvides, noe som vil øke både fordrøyningvolumet og infiltrasjonskapasiteten. Det kan eventuelt vurderes å sette kummene tettere, slik at de håndterer et mindre areal og dermed får en mindre tilrenning.

7.8.2 Metode

Metoden kan kort oppsummeres som følgende nummererte framgangsmåte:

1. K_{sat} -verdien i det aktuelle området måles.
2. Det foreslås en utforming av infiltrasjonssandfanget og omkringliggende pukkvolum.
3. Utformingen er utgangspunktet for beregning av infiltrasjonsareal og fordrøyningvolum.
4. Beregne kummens infiltrasjonskapasitet ved bruk av forenklingen av Darcys's lov $Q = K \cdot A$.
5. Regnenvelopmetoden benyttes for beregne dimensjonerende fordrøyningvolum for kummen.
6. Dimensjonerende fordrøyningvolum sammenlignes med det beregnede.
7. Ved for lite fordrøyningvolum må det vurderes å utvide pukkvolumet for å forbedre kummens kapasitet, eller sette kummene tettere slik at de håndterer en mindre avrenning.

8 KONKLUSJON

8.1 Forskningsspørsmål

Denne oppgaven har som mål å besvarer tre forskningsspørsmål.

1. Hvordan kan man utvikle og verifisere en metode for kapasitetsmåling av infiltrasjonssandfang?

Med infiltrasjonssandfangets kapasitet menes IFS-kummens fordrøyningsvolum og infiltrasjonskapasitet. Fordrøyningsvolumet kan beregnes basert på byggetegninger. For infiltrasjonssandfangene det er utført forsøk på i oppgaven har byggetegningene vært mangelfulle, og beregninger er utført på bakgrunn av antakelser.

Det optimale forsøket for å måle kummens infiltrasjonskapasitet vil være et forsøk hvor kummen fylles med en konstant vannmengde helt til en oppdager at vannstanden i kummen stiger. Det er viktig at infiltrasjonsdykkeren er helt dekt med vann under forsøket. Når vannstanden plutselig stiger kan en anta at pukkvolumet er oppfylt, og at infiltrasjonsraten i grunnen er mettet. Dette kan også kontrolleres ved å sammenlikne det beregnede fordrøyningsvolumet med påfylt vannmengde. Vannmengden som behøves for å så holde vannspeilet i kummen på en konstant høyde over tid tilsvarer vannmengden som infiltrerer ut av pukkmagasinet og er dermed den mettede infiltrasjonsraten.

Vannstanden i kummen under forsøket er avgjørende for resultatet av kapasitetsmålingen. Dette fordi vannstanden inne i kummen er avgjørende for vannstanden og dermed aktiveringen av det omkringliggende pukkvolumet. Vannstanden i kummen under forsøket må derfor samsvare med den høyeste tillatte vannstanden i kummen ved dimensjonering for å få et riktig resultat for kummens høyeste kapasitet.

Alternativt kan også infiltrasjonsflaten beregnes på bakgrunn av byggetegninger. I følge resultatene fra forsøkene i denne oppgaven kan en anta at sidearealene i pukkgroften har et effektivt infiltrasjonsareal på 30-50% og bunnarealet har 100%. For å så beregne en teoretisk infiltrasjonsrate ut fra kummen må en K_{sat} -verdi antas. Det anbefales å gjøre målinger i felt for å finne en representativ verdi for K_{sat} . Infiltrasjonskapasiteten til kummen kan da beregnes med følgende forenkling av Darcy's lov:

$$Q = K * A$$

Hvor Q er infiltrasjonsraten, K er den hydrauliske kapasiteten og A er det effektive infiltrasjonsarealet.

Beregningene av kapasitet og forsøket som måler infiltrasjonskapasiteten kan sammenstilles for å verifisere hverandre og dermed kummens infiltrasjonskapasitet. Kummens totale kapasitet er summen av fordrøyningsvolumet og infiltrasjonskapasiteten. Fordrøyningsvolumet beregnes på bakgrunn av byggetegningene, og er summen av pukkvolumentets porøsitet, hulrommet under kummen og vannvolumet over bunn infiltrasjonsdykker i kummen.

2. Hva er viktige faktorer ved anlegging av infiltrasjonskummer?

Avgjørende faktorer for kapasiteten til en infiltrasjonskum er den hydrauliske ledningsevnen i de stedlige massene, samt utformingen av pukkvolument, da dette er avgjørende for kummens fordrøyningsvolum og infiltrasjonsareal. Dårlig infiltrasjonskapasitet i stedlige masser vil sette krav til større fordrøyningsvolum for å håndtere en dimensjonerende nedbørshendelse.

Kummens utforming med tanke på infiltrasjonsdykkeren og utløpets plassering vil også påvirke kummens kapasitet. Disse plasseringene vil være avgjørende for hvordan vannet strømmer inn i pukkmagasinet, hvor mye som kan fordrøyes inne i kummen og hvor store volumer kummen håndterer før vann sendes i overløp. Vannstanden i pukkvolument vil ikke kunne overstige vannstanden inne i kummen, og utformingen av kummen er derfor avgjørende for aktiveringen av pukkvolument. Fra forsøkene observeres ikke dykkeren å være noe begrensende faktor.

Ved prosjektering er det viktig å ta hensyn til at sandfanget må vedlikeholdes ved tømning og derfor må kummen være tilgjengelig for det aktuelle utstyret som benyttes for tømning.

En bør ha en viss formening av høyden på grunnvannet før en prosjekterer en infiltrasjonsbasert løsning for håndtering av overvann. Generelt bør grunnvannstanden være under 2,5 meter under infiltrasjonsflaten for infiltrasjonsbaserte anlegg for håndtering av overvann. Dette for at grunnvannet ikke skal redusere perkolasjonen og påfølgende infiltrasjonskapasiteten.

3. Hvordan kan en dimensjonere en infiltrasjonkum for bestemte krav til håndtering av overvann?

Infiltrasjonssandfangets infiltrasjonskapasitet beregnes ved en forenklet formel av Darcy's setning, hvor infiltrasjonsraten er produktet av den hydrauliske konduktiviteten og det effektive infiltrasjonsarealet. I følge resultatene fra forsøkene i denne oppgaven kan en anta at sidearealene i pukkgrøften har et effektivt infiltrasjonsareal på 30-50% og bunnarealet har 100%. Det anbefales at K_{sat} -verdien bestemmes på bakgrunn av feltmålinger for å få de mest representative verdiene.

$$Q = K_{sat} * A$$

Hvor Q er infiltrasjonsraten [m^3/s], K_{sat} er den mettede hydrauliske ledningsevnen [m/t] og A er det effektive infiltrasjonsarealet [m^2].

Kummens fordrøyningsvolum vil være et produkt av det omkringliggende pukkvolumet og dets porøsitet. Hulrommet under kumbunnen og vannmengden inne i kummen over bunn infiltrasjonsrør vil også fungere som fordrøyning. Kapasiteten til infiltrasjonssandfanget vil være summen av fordrøyningsvolumet og infiltrasjonsraten.

Infiltrasjonssandfangets krav til kapasitet for håndtering av overvann vil variere og er typisk avhengig av en kommunal VA-norm. Kravene er typisk basert på en dimensjonerende nedbørhendelse med et gitt gjentakintervall. For å dimensjonere infiltrasjonssandfanget til å håndtere volumet av nedbørshendelsen foreslås det å benytte regnvelopmetoden.

Regnvelopmetoden benyttes til å beregne det totale volumet av den aktuelle nedbørshendelsen for alle varighetene av nedbøren. Det totale volumet kummen kan infiltrere i løpet av hendelsens varighet beregnes også. For alle varigheter sammenlignes så kummens infiltrasjonskapasitet med volumet av nedbøren. Den største differansen mellom infiltrasjonskapasitet og volumet av den totale nedbørshendelsen blir så dimensjonerende for kummens fordrøyningsvolum. Ved for lite fordrøyningsvolum må det vurderes å utvide pukkvolumet for å forbedre kummens kapasitet, eller sette kummene tettere slik at de håndterer en mindre avrenning

8.2 Videre arbeid

Forslag til videre arbeid følges som punkter:

- Forsøkene og dimensjoneringsmetoden bør valideres ved hjelp av andre forsøk, metoder og beregninger.
- Kummens kapasitet kan måles igjen etter en tid for å avdekke eventuelt redusert kapasitet på grunn av gjentetting av infiltrasjonsareal. Dette kan være med på å utarbeide en optimal vedlikeholdsplan for slike kumløsninger.
- Det kan med fordel utføres et optimalt forsøk på Tiller og sammenlikne resultatene mot forsøkene i denne oppgaven.
- Å utføre forsøk på en kum hvor infiltrasjonsarealet, fordrøyningvolumet og den stedlige hydrauliske konduktiviteten er kjent kan være med å bekrefte resultatene fra denne oppgaven.
- En ytterligere studie av infiltrasjonskapasitet i sideskrånninger kan validere resultatene fra denne oppgaven.

9 REFERANSER

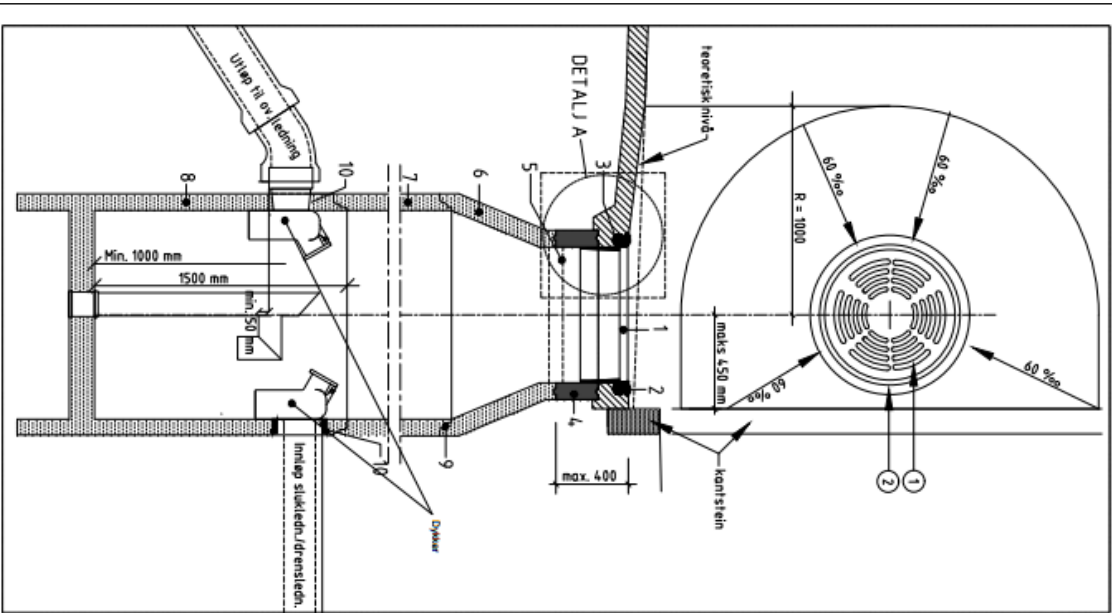
- ALFREDSEN, K. Forelesning Hydrologi. 2015 2015.
- ASPLAN VIAK AS 2014. Overvann som ressurs
- BASAL. 2017. *Lokale overvannsløsninger (LOD)* [Online]. Available: <http://www.basal.no/produktlosninger/29/utforelse/20/Lokale-overvannsløsninger-LOD-> [Accessed 2017].
- BRATTLI, B. 2009. *Fysisk og kjemisk hydrogeologi*, Trondheim, NTNU.
- COWI 2014. Oppgradering/omlegging Vagleskogveien.
- DAVID BUTLER, J. W. D. 2011. *Urban Drainage*.
- DEPARTMENT OF ENVIRONMENTAL RESOURCES 1999. Low-Impact Development Hydrologic Analysis.
- F. AHMEND, J. S. G., J. L. NIEBER, R. HOZALSKI 2014. A Modified Philip-Dunne Infiltrometer for Measuring the Field-Saturated Hydraulic Conductivity of Surface Soil.
- FETTER, C. W. 2001. *Applied Hydrogeology*.
- FINN.NO. 2017. *Karttjenester* [Online]. [Accessed].
- FISRWG, F. I. S. R. W. G. 1998. *Stream Corridor Restoration: Principles, processes, and Practices*. .
- G. FRENI, G. M., G. VIVIANI 2009. Stormwater infiltration trenches: a conceptual modelling approach.
- GEOSYNITA AS. 2016. *Separasjon* [Online]. Available: <https://geosyntia.no/separasjon/> [Accessed].
- GEOSYNTIA AS. 2016. *Filtrering* [Online]. Available: <https://geosyntia.no/filtrering/> [Accessed].
- GEOTEKNISK SEKSJON, TRONDHEIM KOMMUNE, 1977. Grunnforholdsundersøkelser.
- HUSEBY, F. 2002. *Genrell geologi*.
- JIN-LING YANG, G.-L. Z. 2010. Water infiltration in urban soils and its effects on the quantity and quality of runoff. *Springer-Verlag*.
- KIM H. PAUS, T. M. M., BENT C. BRASKERUD 2016. The hydrological performance of bioretention cells in regions with cold climates; seasonal variation and implications for design.

- L. CARLSSON, G. G. 1984. Provpumpning som geohydrologisk undersøkningsmetodik. . *Stockholm: Statens råd för bygnadsforskning, Rapport R41: 1984.*
- LEOPOLD, L. B. 1968. Hydrology for Urban Land Planning - A Guidebook on the Hydrologic Effects of Urban Land Use. Washington: United States Department of the Interior.
- LINDHOLM, O. G. 2015. Overvannsdammer Beregning av volum. *VA-Miljø Blad.*
- M. BERGMAN, M. R. H., M. F. PETERSEN, P. BINNING, O. MARK AND P. S. MIKKELSEN 2011. Evaluation of two stormwater infiltration trenches in central Copenhagen after 15 years of operation.
- MARKUS TULLER, D. O. 2003. Retention of water in soil and the soil water characteristic curve.
- MUTHANNA, T. M. Forelesning. September 2016.
- MØLLER-PEDERSEN, P. 2017. Intervju i forbindelse med oppgaven.
- NATIONAL READY MIXED ASSOCIATION. 2011. *Hydrological Design of Pervious Concrete* [Online]. Maryland, USA: Pervious Pavement. Available: <http://www.perviouspavement.org/design/hydrologicaldesign.html> [Accessed 2017].
- NATURSTYRELSEN 2008. Overløb fra faskiner til dybereliggende jordlag.
- NGU. 2017. *Løsmassekart.*
- NORCONSULT 2014. Infrastruktur Tiller Øst.
- NORSK KLIMASERVICESENTER 2015. Klima i Norge 2100. Miljødirektoratet.
- NOU 2015. Overvann i byer og tettsteder. *In: DEPARTEMENTENES SIKKERHETS- OG SERVICEORGANISASJON INFORMASJONSFORVALTNING (ed.) Norges offentlige utredninger. Oslo.*
- ODDVAR LINDHOLM, S. E., SVEINN THOROLFSSON, SVEINUNG SÆGROV, GUTTORM JAKOBSEN, LARS AABY 2008. Veiledning i klimatilpasset overvannshåndtering 162 2008. *In: VANN, N. (ed.). Norsk Vann.*
- SINTEF BYGGFORSK 2012. Vann i by - håndtering av overvann i bebygde områder. *Byggforskserien.*
- SKJÆVELAND 2017. Basal Storm Type 2. *In: 2, B. S. T. (ed.).*
- SOLHEIM, E. B. 2017. *Infiltrasjon for lokal overvannsdiskonering.* Master, Norges miljø- og bioitenskapelige universitet.

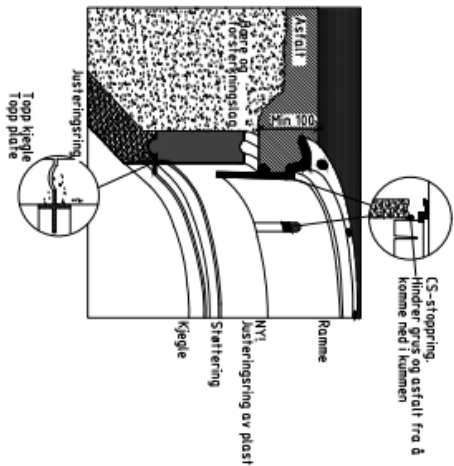
- SSB. 2016. *Befolkning og areal i tettsteder, 1. januar 2016* [Online]. Available: <https://www.ssb.no/befsett> [Accessed].
- STATENS VEGVESEN 2014. Håndbok N200.
- SÆGROV, S. Forelesning Urbane Vannssystemer. 2015.
- TARBOTON, D. G. 2003. Rainfall-Runoff Processes.
- UNITED NATIONS 2015. World Urbanization Prospects; The 2014 Revision.
- UPSTREAM TECHNOLOGIES. 2017. Available: <http://upstreamtechnologies.us/products/mpd.shtml> [Accessed].
- VA/MILJØ-BLAD. *Generelle bestemmelser* [Online]. Available: <http://va-norm.no/dokument/4-grofter-og-ledn-utforelse/4-0-generelle-bestemmelser/?source=126&override=1&real=5607&l=nb> [Accessed].
- XU YANG, X. Y. 2013. Estimating Parameters of Van Genuchten Model for Soil Water Retention Curve by Intelligent Algorithms.
- ØDEGAARD, H. 2012. *Vann -og avløpsteknikk*, Norsk Vann.

10 VEDLEGG

10.1 Vedlegg 1



SANDFANGKUM I GATE
M 1 : 20



DETALJ A M 1 : 10

Merknad:
Kummen omfylles og tilbakefylles med pukk min. 300 mm fra kumvegg. Burnseksjonen settes på en min. 500 mm tykk pute av pukk (f.eks. 32-64 mm)
Infiltrasjonssandfang i gate skal benyttes for:
SF34, SF27, SF26, SF24, SF21, SF20, SF18, SF101, SF103

MATERIELLISTE: SANDFANGKUM GATE

POS I BESKRIVELSE	QNT/TYPE	ANT. BYGGEN
1 Historok	NS 1995 015	1
2 Ramme	NS 1998 015	1
3 CS-støtting	Ø 650	1
4 Justeringsring av plast	Ø 650/700	1
5 AS-støtting	Ø 650	1
6 Kjegle	Ø 300/500	1
7 Kledning	Ø 300/1000	1
8 Kledning med bunn og dykkar (U-gylser U77140)	Ø 300/7500	1
9 Dillepølising	f 10x	2
10 Pølising Dype 1911 et. Hiss.		0

QNT/TYPE	ANT. BYGGEN
300	1

SMH BYGGEBRØDRE:

390

5142624 H211 Z01

H211 Z01

10.3 Vedlegg 3

Areal- og volumberegninger, SF 21 Trondheim. Resultater fra beregninger:

Alternativ 1

Infiltrasjonsareal		
	2.49	m ² Areal bunn
+	10.04	m ² Areal sideflater
=	12.53	m² Totalt infiltrasjonsareal

Fordrøyningsvolum		
	6.36	m ³ Volum pukk
-	1.11	m ³ Volum kum
=	5.25	m ³
x 0.35 =	1.8375	m ³ Effektivt volum pukk
+	0.08	m ³ Volum hulrom
=	1.9175	m³ Totalt fordrøyningsvolum

Alternativ 2

Infiltrasjonsareal		
	2.49	m ² Areal bunn
+	27.65	m ² Areal sideflater
=	30.14	m² Totalt infiltrasjonsareal

Fordrøyningsvolum		
	7.3	m ³ Volum pukk
-	1.11	m ³ Volum kum
=	6.19	m ³
x 0.35 =	2.1665	m ³ Effektivt volum pukk
+	0.08	m ³ Volum hulrom
=	2.2465	m³ Totalt fordrøyningsvolum

Alternativ 3

Infiltrasjonsareal		
	2.49	m ² Areal bunn
+	8.5	m ² Areal sideflater
=	10.99	m² Totalt infiltrasjonsareal

Fordrøyningsvolum		
	3.78 m ³	Volum pukk
-	1.11 m ³	Volum kum
=	2.67 m ³	
x 0.35 =	0.9345 m ³	Effektivt volum pukk
+	0.08 m ³	Volum hulrom
=	1.0145 m³	Totalt fordrøyningsvolum

Alternativ 4

Infiltrasjonsareal		
	0.06 m ²	Areal bunn
+	24 m ²	Areal sideflater
=	24.06 m²	Totalt infiltrasjonsareal

Fordrøyningsvolum		
	9.89 m ³	Volum pukk
-	1.11 m ³	Volum kum
=	8.78 m ³	
x 0.35 =	3.073 m ³	Effektivt volum pukk
+	0.08 m ³	Volum hulrom
=	3.153 m³	Totalt fordrøyningsvolum

Alternativ 5

Infiltrasjonsareal		
	1.29 m ²	Areal bunn
+	10 m ²	Areal sideflater
=	11.29 m²	Totalt infiltrasjonsareal

Fordrøyningsvolum		
	5.2 m ³	Volum pukk
-	1.11 m ³	Volum kum
=	4.09 m ³	
x 0.35 =	1.4315 m ³	Effektivt volum pukk
+	0.08 m ³	Volum hulrom
=	1.5115 m³	Totalt fordrøyningsvolum

10.4 Vedlegg 4

Infiltrasjonstest utført på testområdet til Multiblokk i Sandnes. Testen er utført av Cowi i forbindelse med utbyggingen av feltet.

BEREGNING AV INFILTRASJONSEVNE VHA. INFILTROMETER COWI

Prøvepunkt	
1	Felt 1
2	Felt 2
3	Felt 3
4	Felt 3
5	Felt 3
6	Felt 4



Prøvepunkt	Cm synk i infiltrometer	Tid		cm/sek	Justert for areal og enhet		
		min : sek	Tot. sek		m/døgn	m/s	
1	15	: 46	46	0,33	27,39	0,000317	3,17E-04
2	15	23 : 30	1410	0,01	0,89	0,000010	1,03E-05
3	10	29 : 11	1751	0,01	0,48	0,0000056	5,55E-06
4	10	28 : 19	1699	0,01	0,49	0,0000057	5,72E-06
5	0	:	1	0,00	0,0	0,000000	0,00E+00
6	0	:	1	0,00	0,0	0,000000	0,00E+00

NOTATER	
1	Vegen bygd opp noe over eksisterende terrengnivå. Infiltrasjonsflate i grus.
2	Delvis mekanisk stabile masser (masse som belegningsstein har ligget på) Stedlige jordmasser i bunn.
3	Tilkjørt/kompakt masse. Belegningsstein og annen stein i fyllmassen
4	Tilkjørt/kompakt masse. Belegningsstein og annen stein i fyllmassen
5	Vannmettet masse. Vann i dagen Vannivå stabilt etter 30 min. Infiltrasjonstest avsluttet
6	Tett komprimert sandig masse. Drensrør legges Vannivå stabilt etter 30 min. Infiltrasjonstest avsluttet

10.5 Vedlegg 5

Beregninger av infiltrasjonsrate ved forsøk på Tiller, Trondheim.

Forsøk 1

Volum av påfylling 1		
Radius	0.5	m
Høyde	0.17	m
Volum	134	liter

Volum av påfyllingen 2		
Radius	0.5	m
Høyde	0.2	m
Volum	157	liter

Nedsynking		
Volum [liter]	Tid [sekunder]	Infiltrasjonsrate [l/sek]
134	268	0.50
134	628	0.21

Forsøk 2

Volum av påfylling 1		
Radius	0.5	m
Høyde	0.02	m
Volum	15	liter

Volum av påfylling 2		
Radius	0.5	m
Høyde	0.06	m
Volum	47	liter

Volum av påfylling 3		
Radius	0.5	m
Høyde	0.01	m
Volum	8	liter

Volum av påfylling 4		
Radius	0.5	m
Høyde	0.06	m
Volum	47	liter

Volum av påfylling 5		
Radius	0.5	m
Høyde	0.1	m
Volum	79	liter

Nedsynking			
Påfylling	Volum [liter]	Tid [sekunder]	Infiltrasjonsrate [l/sek]
1	15	133	0.11
2	47	84	0.56
3	8	66	0.12
4	47	69	0.68
5	79	112	0.71

Forsøk 3

Volum av påfylling		
Radius	0.5	m
Høyde	0.16	m
Volum	126	liter

Nedsynking			
Påfylling	Volum [liter]	Tid [sekunder]	Infiltrasjonsrate [l/sek]
1	126	64	1.96
2	126	70	1.80
3	126	103	1.22
4	126	137	0.92
5	126	153	0.82
6	126	156	0.81
7	126	154	0.82
8	126	156	0.81
9	126	161	0.78
10	126	164	0.77
11	126	169	0.74
12	126	167	0.75
13	126	165	0.76
14	126	169	0.74
15	126	171	0.73

10.6 Vedlegg 6

Electric Control System
Automation AS

12.05.17 14:47:03

HISTORISK TREND: SF6

Stormbequa
LOGGE AV

Use Temp. 13.4 °C

Dato	Tid	Alarmtekst
10 mai	17:44:13	SF1_XT01 WIREBREAK
10 mai	17:44:13	SF2_XT01 WIREBREAK
10 mai	17:44:13	SF6_XT01 WIREBREAK
10 mai	17:44:13	SF7_XT01 WIREBREAK

VERSTASJON	SF1	V1	SF6	SF8	TEMPERATUR
PUMPEHUS	SF2	SF7	SF9

ALARM	HISTORIKK	HOVEDBILDE	VAGLESKOGVEIEN	HISTORISK LOGGING	VIS 1
ALARM	HISTORIKK	HOVEDBILDE	VAGLESKOGVEIEN	HISTORISK LOGGING	VIS 1

0.00

309.6 mm

0.0 mm

0.0 mm/h

May 12 12:23:50

May 12 13:04:25

133828

May 12 13:55:18

141221

141814

May 12 14:46:11

0.0 Us

300.1 mm

0.0 mm

0.0 mm/h

Min.

0.0 Us

300.1 mm

0.0 mm

Gj. snitt

0.0 Us

300.1 mm

0.0 mm

Maks.

0.0 Us

300.1 mm

0.0 mm

Penntilordninger

- ✗ SF6_F101 - Flow ut fra SF6
- ✗ SF6_L101 - Røvel SF6
- ✗ SF6_X101 - Slammhal SF6
- ✗ Pumpehus Verstasjon - Nedder

10.7 Vedlegg 7

